



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**NÁVRH ZMĚNY VÝROBY TVÁŘENÉ SOUČÁSTI NA
TECHNOLOGII LITÍ DO KERAMICKÝCH SKOŘEPIN**

PROPOSAL FOR A CHANGE IN THE PRODUCTION TECHNOLOGY OF A FORMED PART ON THE
TECHNOLOGY OF CASTINGS INTO THE CERAMIC SHELLS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Marko Bednárik

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Marko Bednárik**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Slévárenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh změny výroby tvářené součásti na technologii lití do keramických skořepin

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se bude zabývat možností změny výrobní technologie příčky meče, která je v současném provedení koncipována jako tvářená součástka. S ohledem na zvyšující se nároky na tvarovou složitost a přitom akceptovatelnou cenu se tak nabízí řešení ve využití technologie lití na vytavitelný, nebo spalitelný model do keramických skořepin. Tato technologie nabízí téměř neomezenou tvarovou variabilitu, kterou nezvládne jiná výrobní technologie. Při přechodu na tuto technologii je však nutné navrhnout odpovídající konstrukci, materiál, tepelné zpracování a další parametry technologie výroby tak, aby bylo dosaženo požadavků, které jsou kladeny na kvalitu a vlastnosti řešeného dílu.

Cíle diplomové práce:

- návrh výroby příčky meče s využitím technologie odlévání do keramických skořepin,
- návrh konstrukčních změn dílu odpovídající zvolené slévárenské technologii,
- provést rozbor požadavků na řešený díl a navrhnout způsoby dosažení požadované kvality odlitku včetně návrhu materiálu odlitku,
- návrh technologie výroby a vlastní výroba prototypového odlitku,
- vyhodnocení kvality prototypu a rozbor doporučení pro kusovou výrobu řešeného odlitku.

Seznam doporučené literatury:

BEELEY, P.R. a R.F. SMART. Investment Casting. 2nd Edition. London: The Institute of Materials, 2009, 486 p. ISBN 1-906540-57-8.

CAMPBELL, J. Castings. 2nd Edition. Oxford, Butterworth - Heinemann, 2003, 288 p. ISBN 0-750-4790-6.

CAMPBELL, J. Castings Practice. Oxford, Butterworth - Heinemann, 2007, 224 p. ISBN 978-0-75-6-4791-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

BEDNÁRIK Marko: Návrh změny výroby tvářené součásti na technologii lití do keramických skořepin

Táto diplomová práca popisuje proces výroby odliatku metódou vytaviteľného modelu. Zahŕňa výrobu prototypov pomocou aditívnej technológie, zhotovovanie keramických škupinových foriem. Práca taktiež obsahuje experimentálnu časť zameranú na výrobu zvolených súčiastok metódou vytaviteľného modelu a zrovnania tejto metódy s inými druhmi výroby.

Kľúčové slová: Technológia vytaviteľného modelu, aditívne technológie, Maraging 200

ABSTRACT

BEDNÁRIK Marko: Proposal for a change in the production technology of a formed part on the technology of castings into the ceramic shells

This diploma thesis describes the process of production of the cast by the lost-wax casting method. It includes the manufacturing of prototype models by additive technology, creation of ceramic shell molds. The work also includes an experimental part focused on the production of the selected parts by the method of the lost-wax casting and the comparison of this method with other types of production.

Keywords: Lost-wax casting, investment casting, additive technology, Maraging 200

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

BEDNÁRIK, Marko. *Návrh změny výroby tvářené součásti na technologii lití do keramických skořepin* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132254>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Vladimír Krutiš.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Týmto prehlasujem, že predkladanú diplomovú prácu som vypracoval samostatne, s využitím uvedenej literatúry a podkladov, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho diplomovej práce.

V Brne dňa 20.5.2021

.....

Podpis

POĎAKOVANIE

Týmto chcem srdečne poďakovať pánovi Ing. Vladimírovi Krutišovi, Ph.D. za vedenie pri tvorbe práce a pomoc pri experimentálnej časti. Ďalej si dovoľujem poďakovať pánovi doc. Ing. Antonínovi Záděrovi, Ph.D. za užitočné informácie. Moja vďaka taktiež patrí firme SIGI forge s.r.o. a pánovi Ing. Ondrejovi Šaušovi za poskytnutie témy práce ako aj pánovi Ondřejovi Štočkovi za pomoc pri experimentálnej časti.

OBSAH

Zadanie	
Abstrakt	
Bibliografická citácia	
Čestné prehlásenie	
PodĎakovanie	
Obsah	
Úvod	10
1 ROZBOR ZADANIA A VARIANTY RIEŠENIA	11
2 STÁVAJÚCA TECHNOLOGIA VÝROBY	12
3 TECHNOLOGIA PRESNÉHO ODLIEVANIA DIELOV	14
3.1 Požiadavky na odlievane diely	15
3.2 Návrh výroby prototypov priechok a kosov	16
3.2.1 Dizajn riešených modelov	16
3.2.2 Numerická simulácia odlievania tenkostenných odliatkov	19
4 VÝROBA MODELOV PRE ODLIEVANIE	21
4.1 Technológia 3D tlače	23
4.2 PolyCast™	23
4.2.1 Technológia materiálu PolyCast™	24
4.3 Výroba experimentálnych modelov	25
5 POROVNANIE MATERIÁLOV	28
5.1 Nároky kladené na materiál	29
5.2 Weldom 700	29
5.3 EN 42CrMo4	30
5.4 Maraging 200	31
5.5 Porovnanie mechanických vlastností používaných materiálov	32
5.5.1 Tepelné spracovanie materiálu Maraging 200	33
5.5.2 Vyhodnotenie ťahových skúšok	34
6 ZHOTOVENIE KERAMICKEJ ŠKRUPINY	37
6.1 CYCLONE	37
7 PRVÉ ODLIEVANIE OCELE MARAGING 200	39
7.1 Modely	40
7.2 Výroba keramických škrupín	43
7.3 Odlievanie	45
7.4 Zhodnotenie výsledkov	46

8 DRUHÉ ODLIEVANIE OCELE MARAGING 200	49
8.1 Modely	50
8.2 Výroba keramických škrupín	52
8.3 Odlievanie a zhodnotenie výsledkov	56
9 ROZBOR CIEN VÝROBNÝCH POSTUPOV A ICH POROVNANIE.....	60
10 ZÁVERY	62
Zoznam použitých zdrojov	
Zoznam obrázkov	
Zoznam tabuliek	

Úvod

Výroba tréningových mečov pre športové účely je pomerne náročný proces zahŕňajúci prvky remesla ako aj potrebu ovládania znalostí pre správny postup pri výrobe a spracovaní jednotlivých dielcov aby vznikol funkčný a bezpečný meč. Mnohé spoločnosti zameriavajúce sa na túto oblasť trhu produkujú svoje výrobky v tradičnom duchu čo im síce v základných aspektoch postačuje ale nevyhnú sa tak problémom spojeným s niektorými postupmi pri spracovaní a následnom používaní mečov. Modernejšie spoločnosti prechádzajú postupne na výrobu týchto zbraní za pomoci technológií umožňujúcich zrýchlenie a zlepšenie výroby a v poslednom rade zvýšenie kvality samotných výrobkov.

Firma SIGI forge s.r.o. aplikuje moderné technológie v procese svojej výroby a dosahuje pozoruhodné výsledkov docenované mnohými skupinami venujúcimi sa šermiarskym športom po celom svete. Pre optimalizáciu procesu výroby si firma SIGI forge s.r.o. navrhla zmenu technológie dvoch základných komponentov meča z laserom vyrezávaných polotovarov upravovaných do požadovaného stavu na odliatky vyrábané technológiou presného odlievania. Pre realizáciu tohto prechodu bolo oslovené Vysoké učení technické v Brne, obor slévárenství aby poskytli testovacie zázemie pre experimentálne dielce vytvorené firmou, ktoré by sa mali v najbližšej dobe začať vyrábať ako náhrada starej technológie, ako aj rozšírenie portfólia ponúkaného tovaru. Práca bude zhrnutím výsledkov testov a experimentálnych skúšok vykonaných pre potreby určenia kľúčových postupov a materiálov pre tieto odliatky a ich výrobnú technológiu. [1]



Obr. 1: Príklady výrobkov firmy SIGI forge [1]

1 ROZBOR ZADANIA A VARIANTY RIEŠENIA

Súčiastka zvolená pre zmenu technológie je takzvaná priečka meč. Jedná sa o priečne vedený prvok chrániaci ruku užívateľa pri prevádzke meča. Druhým prvkom, ktorý bude nahradený odliatkom je hlavica meča. Jedná sa o ornamentálne zakončenie spĺňajúce taktiež vyvažovaciu funkciu ako protiváha čepele.

Primárne zameranie práce spadá na technologicky zložitejšiu priečku, pri ktorej sa predpokladá najvýznamnejší rozdiel v čase potrebnom pre výrobu a osadenie priečky, čo má najvýraznejší vplyv na montáž a výrobu finálneho produktu. To samozrejme predstavuje prvoradý cieľ práce, nakoľko sa tak výrazne zrýchli dodanie meča zákazníčkovi. Taktiež je nutné poznamenať že napriek menšej technologickej náročnosti pri výrobe hlavíc na meče, je firma SIGI forge s.r.o. schopná vytvárať produkty, ktoré nie je možné replikovať tvarovo pomocou normálnych technológií, alebo aspoň nie v dostatočnej rýchlosti a kvalite na ktoré si firma zakladá. Tvarová a štruktúrna rozmanitosť pre návrh ornamentálne zdobených mečov je sama o sebe veľmi veľkou výhodou pri zmene technológie. [1]

Náhrada technológie výroby súčiastky a samotné testovanie materiálov pre nové druhy priečok je súčasťou komplexného riešenia problému pre firmu SIGI forge s.r.o.. Štruktúra práce prechádza jednotlivé aspekty problematiky, z ktorých sa napokon vyvodí záver a zhrnutie prínosu experimentu pre výrobu. Časti práce sú rozdelené nasledovným spôsobom:

- I. Prvá problematika je predstavenie starej technológie a postupu výroby dielov spoločnosťou SIGI forge s.r.o., pre oboznámenie čitateľa s procesom, ktorý sa optimalizuje. Zameriame sa na hlavné problémy výroby, kritické body a pracovné postupy predlžujúce výrobný proces. Následne bude predstavená metóda nahradzujúca tento postup. Spomenieme hlavné výhody technológie presného odlievania a jeho priamy vplyv na výrobu a efektivitu zhotovovania mečov. [1] [2]
- II. Druhým bodom práce bude náhľad na nové súčiastky vytvárané pre technológiu presného odlievania, dizajn nových dielov, ich technologické spracovanie ako aj materiály zvolené pre výrobu. [1] [2]
- III. Posledný bod je vyhradený pre výsledky experimentálnych skúšok a analýzu výsledkov nadobudnutých pri testovaní materiálov zvolených pre výrobu odliatkov. Na základe týchto poznatkov budú navrhnuté odpovedajúce dokončovacie operácie pre splnenie prísnych funkčných a bezpečnostných požiadaviek kladených na inkriminované dielce zbraní.

2 STÁVAJÚCA TECHNOLOGIA VÝROBY

Meče vo firme SIGI forge s.r.o. sa vyrábajú ručne z polotovarov dodávaných od rôznych dodávateľov. Základná zostava meču sa skladá z desiatich častí pri použití dielov vyrobených pre aktuálny spôsob výroby. Pre úplnosť informácií budú ďalej popísané všetky časti, aj tie, ktoré sa v experimente nevyskytujú ako súčasť problematiky:

- Telo meča je vytvorené jedným dielom ktorý je predelený priečkou na **trň** a **čepel'**. Trň meča je miesto kde je v závere výroby uchytená rukoväť ako aj bod v ktorom je umiestnená technológia pre zaistenie pozície záštity a ukotvenie hlavice meča. Diel je výpalok zhotovovaný pomocou technológie laserového rezania z tvárneného materiálu Weldom 700. Do dielne je dodávaný ako jednotvárny kus kovu o hrúbke trňa po celej dĺžke. Čepel' dostáva svoju finálnu podobu za pomoci ručného brúsenia na požadovaný tvar a hrúbku. Brúsenie je robené ručne pre dosiahnutie presnej hmotnosti, rozloženia váhy po dĺžke čepele ako aj jej tuhosti pre bezpečné a bezproblémové používanie v zápasoch. Tieto úpravy by bolo veľmi problematické nahrádzať robotizáciou a vyžadujú si ľudský vstup do procesu výroby. [1]
- Súčasťou čepele je rozšírené miesto s názvom **shilt**. [1]
- **Rukoväť** je drevená časť meča najčastejšie obalovaná kožou. Diel sa skladá z dvoch častí frézovaných z bukovej preglejky do požadovaného tvaru. Po začistení a napasovaní na zbytok meča sa oba diely spoja s trňom pomocou nitov. Následne sú ručne obalované rozmanitými druhmi kože a iných materiálov podľa špecifikácie zákazníka. [1]
- Meč je zakončený dielom označovaným **hlavica**. Táto súčiastka, ako je možné vidieť na obrázku 2, funguje ako efektívna protiváha meča, pričom vyrovnáva balans pre lepšiu manipuláciu a ovládanie nástroja. V momentálne používanom procese ide o obrobok guľovitého tvaru z ocele C45. Hlavica je zväčša rotačná súčiastka opracovaná sústružením. V prípade potreby či úpravy dizajnu je následne ručne frézovaná na požadovaný tvar. Proces je ukončený zalepením a zanitovaním na trň



Obr. 2: Hlavica [1]

- **Priečka** meča je centrálnym zameraním experimentálnej časti projektu a predstavuje zásadný bod pokroku technológie vo výrobe. Starý spôsob výroby priečok začína pri laserovom výpalke zhotoveného z materiálu Weldom 700. Tento materiál bol zvolený na základe väčšej pevnosti. Jedna z ďalších podmienok ktoré Weldom 700

meča. Materiál použitý pri tomto dielci nehrá pre funkčnosť meča veľký význam a nie sú na neho kladené skoro žiadne nároky čo sa jeho mechanických vlastností týka. Veľkým významom však zostáva estetická funkcia tejto časti a celkový vzhľad meča vyplývajúci z použitia viac zdobených hlavíc. Pri tomto diely sa firma SIGI forge s.r.o. rozhodla prejsť na technológiu presného odlievania, najmä kvôli rozmanitým možnostiam dizajnov ktoré táto technológia poskytuje. Za zmienku taktiež stojí fakt, že pri výrobe hlavíc presným odlievaním je do firmy dodaný výrobok nutné upravovať veľmi minimálne, čím sa znižujú nároky na čas výroby jedného kusa a taktiež hodiny odpracované zamestnancami. Tieto faktory v závere vedú ku zníženiu výrobných nákladov mečov pričom paralelne zvyšujú ich tržnú cenu vďaka nadštandardným tvarom a dizajnom, ktoré je ale možné zhotovovať vo veľkosériovej mierke. [1]

spĺňa, je jeho dobrá zvárateľnosť, ktorá je pri tomto spôsobe výroby kľúčová. Proces výroby priečky je nutné pre ciele tejto práce dôkladne priblížiť. [1] [3]

Priečka je zhotovená dokopy z 3 dielov ako je možné vidieť na obrázku 3. Začiatok procesu predstavuje surový výpalok z materiálu Weldom 700 zhotovený laserovým rezacím lúčom. Tento prvotný kus materiálu je zobrazený na obrázku 3 ako bod 1. Povrch výpalku je následne opracovávaný ručne, pomocou brúsnych kotúčov, do podoby ktorú je možné pozorovať na obrázku 3 ako pozíciu 2. Uvedenie prvotného výpalku do tohto stavu zaberie skúsenému pracovníkovi približne 30 minút práce na každý kus. Nasledujúcim krokom je obrobenie štrbiny do ktorej sa vkladá trň meča a vytvorenie dosadacích rádiusov na spodnej časti priečky. Ku hlavnej časti dielca je taktiež nutné zhotoviť dve dodatočné telieska označované v praxi ako podperky. Tieto dve samostatné súčiastky sú taktiež výpalok z materiálu Weldom 700, zhotovené rovnakou technológiou ako samotné telo priečky. Podperky sú opracované brúsením na brúsnych kotúčoch, rádiusy spojovacích dier sú upravené na požadovaný finálny rozmer a hrany týchto otvorov sú zrazené pre zarovnanie nitov pri montáži na telo meča. Upravované sú taktiež hrany priečok. Tie je nutné zbrúsiť na uhol v ktorom bude možné ich pripojenie. Dokončené súčiastky sú taktiež viditeľné na obrázku 3 v pozícii 2. Podperky sú v nasledujúcom kroku technológie výroby zvarené s hlavnou časťou priečky. Zvar môže mať veľmi negatívne následky na pevnosť a životnosť celého produktu ak je zhotovený chybné, preto sa kladie značná pozornosť na tento bod výroby. Po dokončení zvarovania musí byť celá priečka veľmi dôkladne obrúsená a samotná plocha zvaru opracovaná do hladkého koncového vzhľadu. Pri tomto procese taktiež prebieha vizuálna kontrola zhotovenia zvaru. V prípade akýchkoľvek väd musí byť priečka opravovaná. Tento proces taktiež vyžaduje čas a skúsenosti pracovníka zodpovedného za riadenie výrobného procesu. [1] [3]



Obr. 3: Výrobné body priečky z materiálu Weldom 700

Výsledný produkt, ako je zobrazený na obrázku 3 v pozícii 3, je po dokončení opracovania a zvarovania pripravený na spojenie so zbytkom meča. Priečky meča sú vyrábané v rôznych prevedeniach, od rozdielnych dĺžok tela dielcu až po jednoduché variácie tvaru súčiastky. Tieto úpravy sú taktiež dosahované ručným obrábaním súčiastok, používaním kratších výpalkov z materiálu Weldom 700 či ohýbaním pre

dosiahnutie celkovej zmeny priečky. Tieto úpravy sú špecifické pre dané výrobné rady mečov firmy SIGI forge s.r.o.. Na obrázku 4 je znázornená jedna z dokončených variant priečky implementovaná do finálneho produktu. [1]



Obr. 4: Príklad priečky meča firmy SIGI forge s.r.o. [1]

Jedným zo značných problémov tejto technológie výroby dielov meča je časová a odborná náročnosť na personál. Nielen že je nutné priečky z Weldoxu 700 dobrušovať na požadovaný tvar ručne s dostatočnou presnosťou a finálnym dohotovením ako požaduje zákazník, taktiež je veľmi podstatné správne a zdravé zhotovenie zvarov medzi telom a podpierkami na zabezpečenie celkovej pevnosti a bezpečnosti produktu.

Nesmieme taktiež opomínať opakovateľnosť tohto procesu. Pri malosériovej výrobe je možné dovoliť si investíciu času do jednotlivých kusov pri zhotovovaní a ručné opracovávanie dielcov. Tento proces avšak nedokáže ďalej pokryť dopyt produktov firmy SIGI forge s.r.o.. Pri tomto množstve je opakovateľnosť výroby značne ovplyvnená časovou náročnosťou procesu, ako aj konkrétnym pracovníkom zodpovedajúcim za danú várku produktov. Toto sú hlavné body na ktoré by sa mala zamerať technológia presného odlievania vo výrobnom procese zhotovovania mečov na verziu nového športového šermu HEMA (Historical European Marshal Arts). [1] [4]

3 TECHNOLÓGIA PRESNÉHO ODLIEVANIA DIELOV

Pre rozvoj výrobného procesu bola zvolená technológia presného odlievania. Tento proces by mal byť schopný pokryť všetky spomínané nedostatky starej technológie výroby. Na odlievajú súčiastku sú kladené vysoké nároky s ohľadom na tvar a presnosť zhotovenia.

Odliatok by mal byť zhotovený do finálneho tvaru dielca bez nutnosti zvarovania a vybrušovania nábehov pre osadenie na telo meča. Odstránenie operácie brúsenia súčiastky, začisťovania zvarov poprípade ich oprava. Dosiahnutie tvarovej opakovateľnosti jednotlivých druhov produktov bez veľkých variácií. Toto sú základné body v ktorých proces presného odlievania prevyšuje klasickú technológiu úpravy laserových výpalkov. Pri zavedení tejto technológie sme schopní zredukovať výrobný čas na jednu klasickú priečku o 30% až 40%. Finálne úpravy na odliatkoch sú minimálne a zväčša sa jedná o kozmetické úkony.

Technológia presného odlievania ale zďaleka neposkytuje iba úsporu času a zlepšenie efektivity výroby. Prináša so sebou taktiež mnoho jedinečných možností pre rozšírenie

sortimentu výroby. Tam kde bola stará technológia obmedzená na tvary rezané z plechu či obrábané na sústruhu ponúka presné odlievanie do keramických škrupín veľkú tvarovú rozmanitosť a takmer neobmedzenú náročnosťou požadovaného dielca. Druhým veľkým posunom pri zavedení tohto procesu je možnosť výroby dielov z rôznych materiálov ktoré poskytnú mečom charakteristické vlastnosti požadované buď priamo zákazníkom alebo zaradené firmou SIGI forge s.r.o. do svojho prémiového sortimentu produktov. [2] [5]

Ako východzí materiál bola zvolená odlievaná oceľ 42CrMo4 pre svoju dobrú prekaliteľnosť ako aj dobré možnosti leštenia a tvárnenia v odliatom stave pre prípadné opravy či modifikácie konkrétnych kusov. Pričky zhotovené z materiálu 42CrMo4 sú po odliatí normalizačne žíhané, kalené a popúšťané hodnotu 52 HRC ktorá je štandard pre šermiarske meče.

V rámci výskumu diplomovej práce bol taktiež testovaný experimentálny materiál Maraging 200. Táto oceľ bola navrhnutá ako logický krok vo vývoji materiálov pre výrobu dielov na meče technológiou presného odlievania. Vlastnosti tohto materiálu by mali podľa predpokladov prevyšovať oceľ 42CrMo4 a tým posunúť kvalitu výrobkov firmy SIGI forge s.r.o. na novú úroveň. [6]

3.1 Požiadavky na odlievané diely

Predmet práce, náhrada obrábaných a tváraných súčiastok za odlievané, zahŕňa nielen správne prevedenie procesu výroby a dodanie odliatkov v dostatočujúcom stave a bez vnútorných väd, ide taktiež o splnenie podmienok nutných pre bežné používanie mečov zhotovených s odlievanými dielcami. Súčiastky je nutné zhotoviť tak, aby boli ich mechanické vlastnosti čo možno najpodobnejšie tým, ktoré sa bežne používajú.

Jedným z primárnych kritérií je nutnosť spracovania výrobku na tvrdosť odpovedajúcu približne 50 HRC. Táto hodnota je zaužívaná u výrobcov zbraní v Európe. Čepele s touto tvrdosťou sa bežne vyskytujú v turnajoch či tréningoch športu HEMA. Pri kontakte čepele meča



Obr. 5: Nebezpečné poškodenie priečky meča

so záštitou by pri nedostatočnej tvrdosti mohli vzniknúť otrepy a poškodenie na povrchu dielu. Tento problém nielen že znižuje kvalitu produktu a jeho výzor po pomerne krátkom používaní, je taktiež nebezpečný, nakoľko spomínané otrepy sú často ostré a môžu spôsobiť poranenie pri manipulácii s produktom. Tento problém si môžeme všimnúť na príklade Obrázku 5. Materiál by mal zvládať odolávať týmto poškodeniam pokiaľ možno lepšie ako staré tvárnené dielce. [4]

Ďalším dôležitým požiadavkom na odlievané súčiastky je obrobitelnosť, opraviteľnosť a lešiteľnosť. Diely vyrábané technológiou presného odlievania je nutné dokončovať do finálneho stavu, preto by bol preferovaný materiál s malou tvrdosťou po odliatí ktorý by svoje finálne charakteristiky dosahoval až následným tepelným spracovaním. Pri tom nesmie dôjsť k deformácii a zničeniu povrchu súčiastky. Ten je pre výsledok procesu výroby kľúčový z pohľadu lešiteľnosti a výzoru dokončeného produktu.

Posledný faktor ovplyvňujúci voľbu materiálu je možnosť opraviteľnosti. Tento bod je spojený skôr so samotným procesom výroby odliatkov než s výrobou mečov. Faktom zostáva, že výroba dokonalého odliatku je nemožná, každá technológia prináša úskalía ktoré zapríčiňujú vnesenie väd do produktu. Tieto vady nemusia byť závažné a automaticky vyradiť odliatok ako vadný kus. Pri testovaní možností odlievania tenkostenných odliatkov sa veľmi často naráža na problémy spojené s poruchami vizuálnej časti odliatku, ktoré sú v tomto prípade neprípustné,

no nemajú zásadný vplyv na funkčnosť a bezpečnosť výrobku a mali by sa preto dať opraviť metódou zavarovania. Z tohto dôvodu by mal byť materiál zvolený pre experiment plne zvárateľný v odlievanom stave pre korekciu akýchkoľvek vizuálnych väd na inak plne funkčnom odliatku.

3.2 Návrh výroby prototypov priechok a košov

Pre realizáciu experimentálnej časti práce boli zvolené modely vytvorené firmou SIGI forge s.r.o. ako prototypové, súčasne bola taktiež metodika výroby overovaná aj na stávajúcej výrobe za použitia modelov, ktoré sú už zhotovované technológiou presného odlievania. Tieto súčiastky je nutné zhotoviť dostatočne rýchlo a zároveň v odpovedajúcej povrchovej kvalite aby sa dali použiť v praxi. Dielčie problémy určovania správnej technológie pre prototypovú výrobu zahŕňovali rýchlosť možného procesu, už spomínanú kvalitu a symbiózu s procesom presného odlievania. [1]

Modely boli posudzované vzhľadom na komplexnosť ich geometrického riešenie. Z toho vyplývala náročnosť zhotovovania týchto súčiastok. Pre samotnú realizáciu bola zvolená FDM metóda 3D tlače, ktorá poskytuje možnosť výroby tvarovo veľmi komplexných dielcov. Tento proces je taktiež veľmi časovo vhodný a perfektne sa hodí na kusovú výrobu. [7]

Ďalším úskalím je samotná voľba materiálu pre tlač. Kombinácia kvality povrchu tlačenej modelu a technologických vlastností samotného materiálu musí byť zvážená pre správne fungovanie nadväzujúcich krokov výroby odliatkov pomocou technológie presného odlievania. Materiál by sa mal približovať voskom používaným v bežnej prevádzke a nemal by spôsobovať poškodenie škrupín či dokonca fatálne zničenie pri vypaľovaní modelov. Čistota výpalu taktiež hrá veľkú úlohu, podiel zbytkového popola veľmi výrazne ovplyvňuje výslednú povrchovú kvalitu odliatku a preto môže mať zásadný vplyv medzi odliatím chybného kusu či zhotovenie zdravého odliatku.

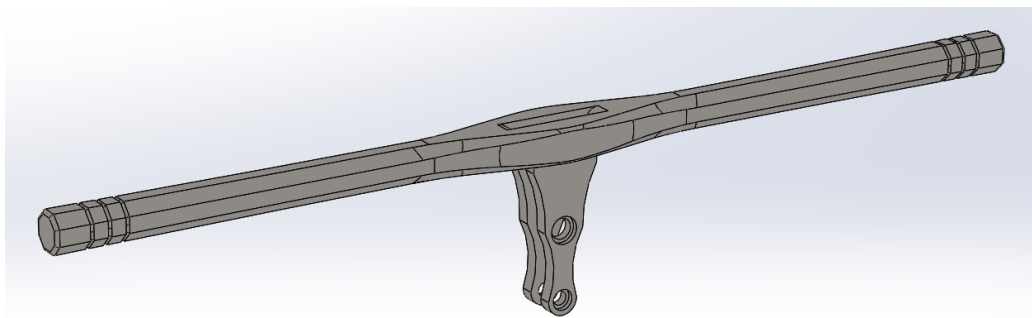
Jeden z ďalších problémov ktoré je nutné pri tomto procese zohľadniť, bolo samotné odlievanie tenkostenných odliatkov. Pri výrobe dielov ktoré majú hrúbku steny 1,5mm takmer na celej ploche je vždy veľkým rizikom nezabehnutie kovu do celého objemu formy. Tento efekt môže nastať či už nesprávnou viskozitou samotného materiálu, príliš nízkou teplotou odlievania či nedostačujúcim odvzdušnením dutiny formy, ktoré zapríčiní zachytenie vzduchu v kritických miestach. Pri snahe o predvídanie tejto problematiky boli do práce zahrnuté testy s použitím numerickej simulácie procesu plnenia formy, v snahe o zlepšenie procesu odlievania a vyvarovaniu sa problémom, ktoré by mohli pri plnení formy roztaveným kovom nastať.

Celkovo sa jedná o využitie všetkých dostupných metód Rapid Prototyping, či už pre zhotovenie samotných modelov až po výrobu jednotlivých keramických škrupín. Týmto spôsobom bolo možné realizovať vyhotovenie modelov v požadovanom časovom rozsahu.

3.2.1 Dizajn riešených modelov

Primárny model určený pre experiment, dodaný firmou SIGI forge s.r.o., je klasická osem hranná priečka meča. Tento tvar bol vyvinutý ako náhrada klasického rotačného modelu. Nakoľko disponuje klasickým dizajnom, ktorý je zároveň ľahko reprodukovateľný pri bežnej sériovej výrobe, ale tvarovo veľmi nevhodný pre obrábanie sústružením, ide o ideálny produkt pre zhotovovanie metódou presného odlievania. [1]

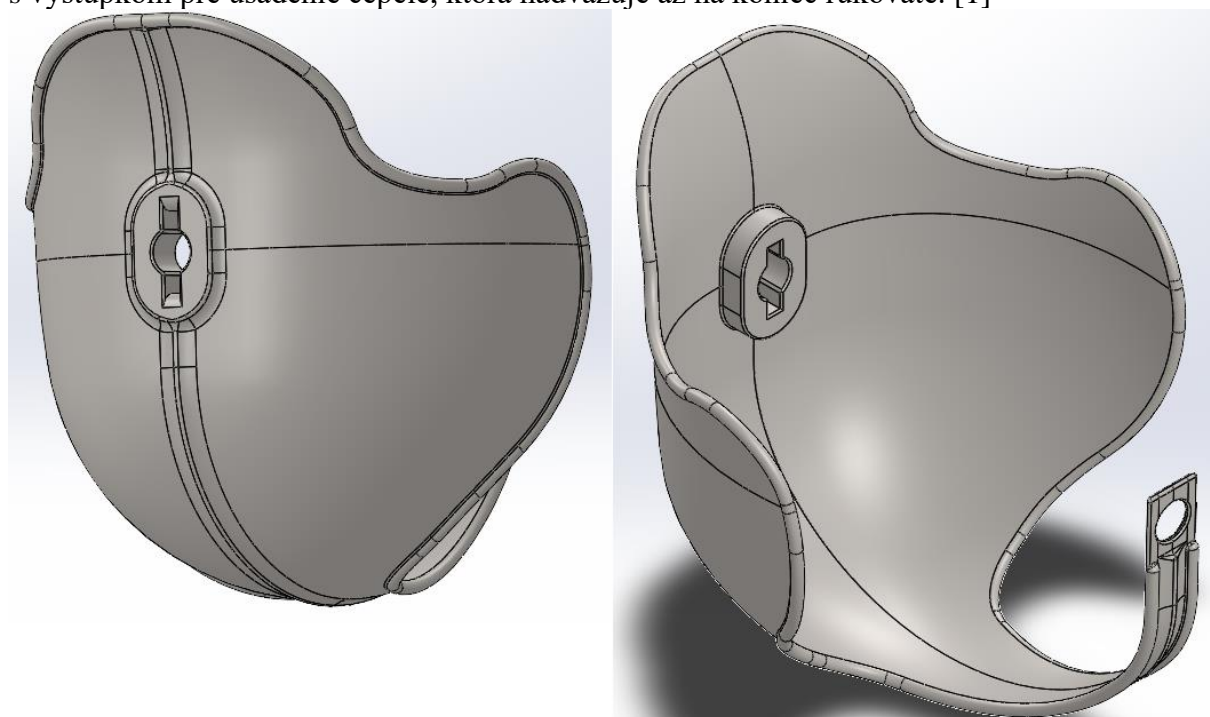
Táto priečka sa momentálne vyrába pre firmu SIGI forge s.r.o. ako sériový produkt pre ktorý bola zaobstaraná aj vlastná forma na voskový vstrekolis. Tento fakt umožňuje zaobstaranie samotných voskových modelov ktoré boli následne transportované do Brna pre spracovanie v projekte. Priečky neboli ďalej tvarovo upravované ani nijakým spôsobom dizajnovu menené. Cieľom odlievania týchto priechok bolo v prvom rade testovanie zbiehavosti a tvarovej presnosti materiálu Maraging 200 ako aj jeho povrchovej úpravy. Geometria je zobrazená na obrázku 6.



Obr. 6: Osem hranná priečka meča firmy SIGI forge s.r.o.

Vybrané Maragingové priečky budú po tepelnom spracovaní zaslané firme SIGI forge s.r.o. pre vykonanie crash testov s rôznymi čepeľami na overenie bezpečnosti a funkčnosti dielov v ich finálnom prostredí a pri záťaži ktorá sa od nich očakáva počas ich životnosti.

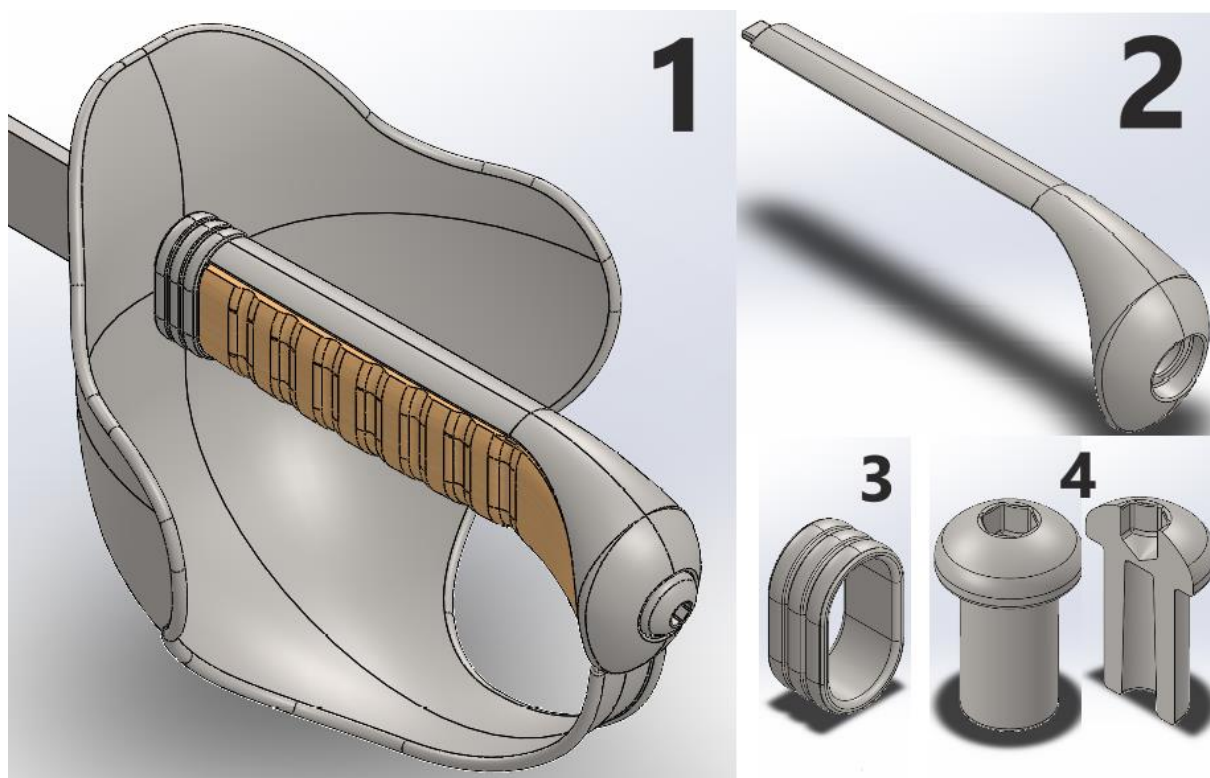
Druhým modelom dodaným pre test bol prototypový model koša na šablú. Jedná sa o vývoj v sortimente firmy a rozšírenie výrobných procesov. Pre tieto súčiastky je typická ich tenkostennosť dosahovaná konvenčne technológiou kovania. Kované koše jednoznačne predstavujú historicky presné výrobky, no časová náročnosť pri ich výrobe z nich zároveň robí veľmi náročné a drahé produkty, nevhodné pre stredne veľkú sériovú produkciu ktorá je odhadovaná pre tento druh zbrane po uvedení na trh. Návrh technológie presného odlievania by mal tento problém vyriešiť už len z pohľadu rýchlosti výroby a ceny odliatku. Veľkým faktorom však zostáva či budú odlievané kusy dosahovať dostatočné hodnoty mechanických vlastností aby sa dali považovať za plne funkčné a bezpečné pre použitie. Tieto podnety by mal taktiež pokrývať materiál zvolený pre experiment. Tenkostenné odliatky z materiálu Maraging 200 budú podliehať odlišnému tepelnému spracovaniu ako hrubšie odliatky pre obmedzenie oxidačných blán na povrchu dielca pre zabránenie znehodnotenia povrchu súčiastky. Samotný model je znázornený na obrázku 7. Ako je možné pozorovať, jedná sa o spojitú geometriu s výstupkom pre usadenie čepele, ktorá nadväzuje až na koniec rukoväte. [1]



Obr. 7: Geometria koša šabl'e

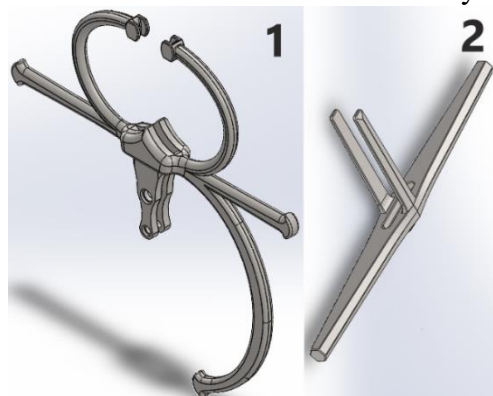
Hrúbka modelu je konštantná pozdĺž celej plochy, a to presne 1,5mm. Táto hodnota je veľmi hraničná pre technológiu presného odlievania a preto bola z modelu zhotovená simulácia pre lepšie pochopenie priebehu zabiehania kovu do dutiny. Pre rozvod kovu a lepší priebeh zaplňovania je model vybavený valcovitou obrúcou, tiahnucou sa pozdĺž celého okraja koša, ako aj rebrom vedeným stredom súčiastky, taktiež pre uľahčenie zabiehania kovu v škrupine.

Pri výrobe modelov boli taktiež zhotovené komponenty pre kompletovanie rukovätí tenkostenných košov. Spomínané komponenty je možno vidieť na obrázku 8. Celá zostava, zobrazená na pozícii 1, pre zhotovenie koša pozostáva z krytky rukoväte, obrúčky objímajúcej časť rukoväte kde sa stretáva krytka so samotným košom a skrutku pre ukotvenie krytky na rukoväť so závitom. [1]



Obr. 8: Zostava šablony a jednotlivé diely

Krytky rukoväte možno pozorovať na obrázku 8 pod označením 2. Tieto modely boli taktiež súčasťou testu zabiehavosti nakoľko pozostávali z tenkostenného profilu o dĺžke 9 centimetrov. Druhým modelom pre realizáciu kompletovania rukoväte šablony, zobrazeným na obrázku 8 pod označením 3 je objímka spájajúca samotný koš s krytkou. Posledným prvkom zostavy je skrutka slúžiac na stiahnutie všetkých častí rukoväte do pevného celku pri montáži. Diel je znázornený na obrázku 8 pod označením 4.



Obr. 9: Vizualizácia geometrií

Pre jedinečnú možnosť zaobstarania testovacích odliatkov priamo z materiálu Maraging 200 boli ku tavbám pridané aj doplnkové druhy modelov. Niektoré fungovali ako vzorky na sledovanie trhlín či výskytu iných väd. Pre tento konkrétny prípad boli vyhotovené dva druhy modelov priečok, zobrazených na obrázku 9. Priečka s označením 1 bola zaradená do experimentu pre sledovanie zabiehavosti tvarovo náročných odliatkov. Šalba pod označením 2 obsahovala tenkostenné prvky ktoré boli sledované pri druhej tave.

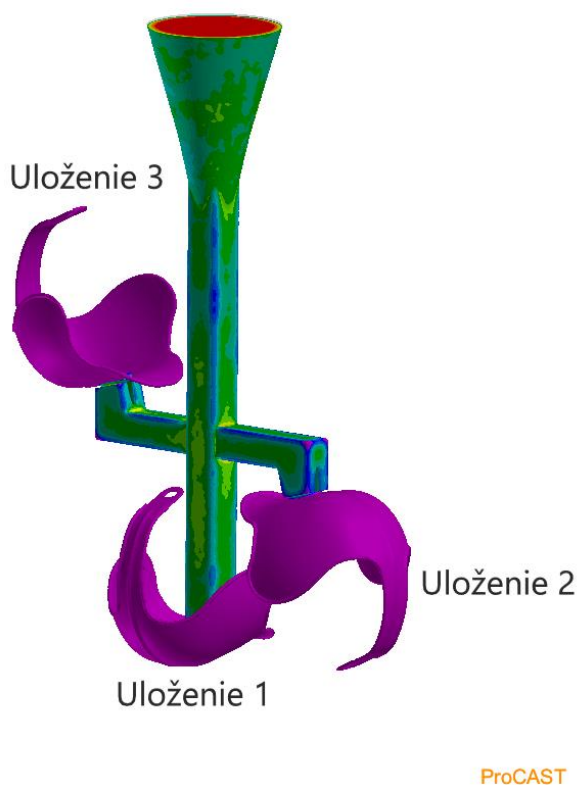
3.2.2 Numerická simulácia odlievania tenkostenných odliatkov

Pre výrobu košov pre šable bola zvolená hrúbka steny 1,5mm po celej ploche modelu. Tento fakt zaraďuje daný odliatok medzi veľmi problematické a technicky náročné výrobky aj pri ohľade na limity presného odlievania, ktoré sú značne lepšie než bežne užívaná technológia.

Za účelom zlepšenia zabiehavosti a zaistenia dobehnutia kovu do kritických miest na koši bol základný model vybavený dvoma rebrami ako bolo spomínané pri rozbere geometrie modelu, avšak pre samotnú náročnosť bola zvolená kontrola vtokovania a plnenie dutiny formy za užitia numerickej simulácie odlievania.

Pre tento účel bol zvolený program proCAST umožňujúci široké spektrum podmienok a sledovaných závislostí pri plnení formy kovom. Pre účely tejto práce bola sledovaná zbiehavosť materiálu v dutine formy pomocou funkcie VOID. Pre prevedenie simulácie bol použitý model dodaný firmou SIGI forge s.r.o., ktorý presne zodpovedá košom zhotovovaným pri prvom odlievaní materiálu Maraging 200. [8]

Pre vtakovanie koša boli s ohľadom na simulácie zvolené tri varianty zobrazené spolu s vtokovou sústavou na obrázku 10. Prvá varianta riešenia zahŕňa napojenie modelu priamo na spodnú časť vtokového kola. Tento variant bol zvolený ako extrémny prípad pre maximalizovanie hydrodynamického tlaku pôsobiaceho na kov v odliatku, ktorý zabezpečuje plnenie a dotlačenie kovu aj do najtenších miest v dutine formy. Varianta bola použitá pri



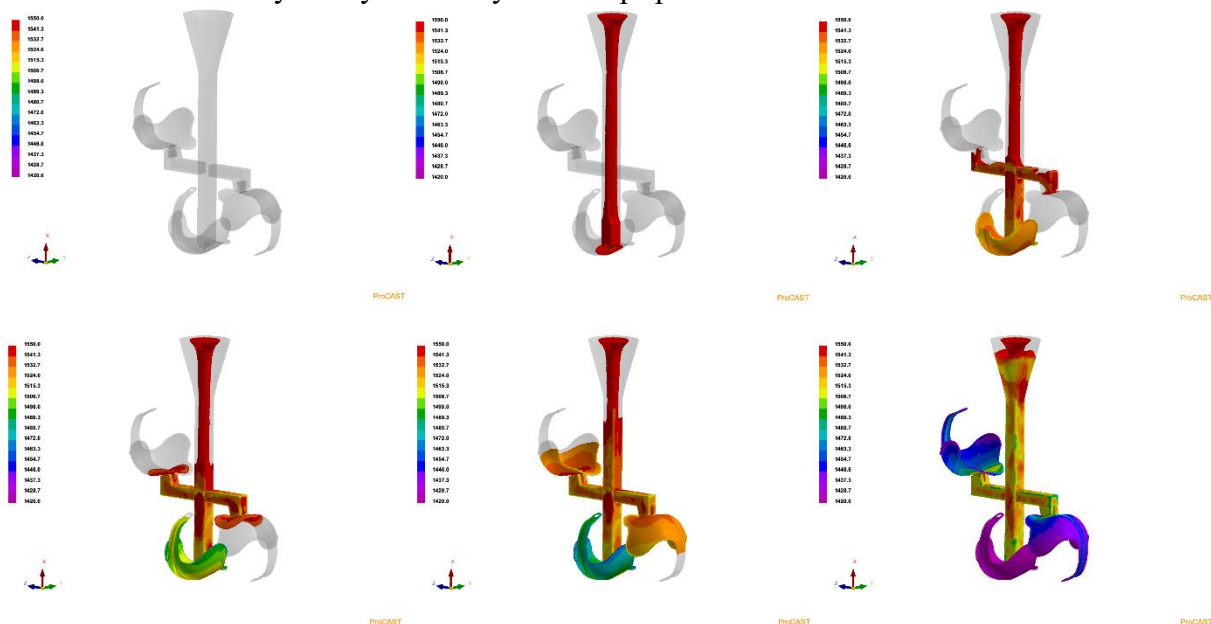
Obr. 10: Druhy vtakovania modelov

prvom odlievaní ako testovacie riešenie pre overenie výsledkov simulácie. Pre praktickú výrobu avšak nepredstavuje rentabilný spôsob výroby odliatkov nakoľko obmedzuje odlievací kôl iba na jeden model. Navyše je vtok lokalizovaný vo vnútri konvexnej časti modelu čo takmer znemožňuje oddelenie vtokovej sústavy a apretáciu odliatku.

Druhá varianta spolu s tretou sú menej náročné na hydrodynamický tlak s ktorým pracujú, čo by sa v reálnom experimente mohlo ukázať ako problematické pre malú tlakovú silu ktorá posúva kov do celej dutiny. Dôvodom tato navrhnutých umiestnení modelov je lepšia lokalizácia na vtokovom kole ktorá umožňuje výrobu štyroch košov kontinuálne za využitia jednej vtokovej sústavy. Týmto spôsobom je možné pristúpiť k malosériovej výrobe, ak sa ukážu výsledky z experimentu ako uspokojujúce. Zásadný rozdiel medzi druhým a tretím uložením je v otočení koša vzhľadom na hladinu prúdiaceho kovu.

Pri uložení 2 je model napojený na vtok spôsobom horného plnenia, pri ktorom kov vbehne do formy pomerne rýchlo, avšak taktiež menej kontrolované. Pri tejto variante je zaistený kratší čas zaplnenie dutiny formy, za cenu možného výskytu rozstreknutia kovu, čo by malo za následok výskyt neopraviteľných väd na odliatku. Pri uložení 3 je model orientovaný opačne. Vtok je napojený spôsobom spodného plnenie formy. Tento spôsob zlepšuje prúdenie kovu do dutiny, pričom je stúpanie rovnomerné a pokojné, avšak relatívne pomalšie ako pri uložení 2. Oba tieto spôsoby značne zlepšujú prístup ku vtokovému systému po odliatí a výrazne urýchľujú odstránenie vtokovej sústavy a apretáciu výrobku.

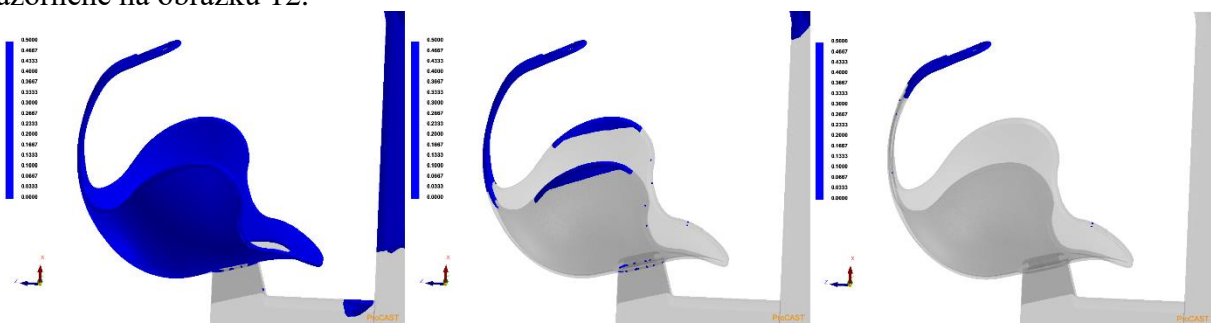
Pre absenciu tohto konkrétneho materiálu: Maraging 200, sme boli nútený nahradiť ho náhradným materiálom. Priebeh plnenia formy bol simulovaný s vlastnosťami ktoré sa podľa informácii mali najviac približovať chovaniu materiálov Maraging. Plnenie formy je znázornené na obrázku 11 ako súbor šiestich krokov ktoré znázorňujú kľúčové body pri zabíjaní kovu do dutiny formy vo všetkých troch prípadoch vtokovania modelov.



Obr. 11: Súhrnné znázornenie zaplňovania dutiny formy a rozloženie teplotných polí

Podľa spôsobu plnenia sme určovali najmä plynulosť zaplňovania jednotlivých modelov na základe ktorej sme zhodnocovali optimálne uloženie modelu v rámci vtokovej sústavy.

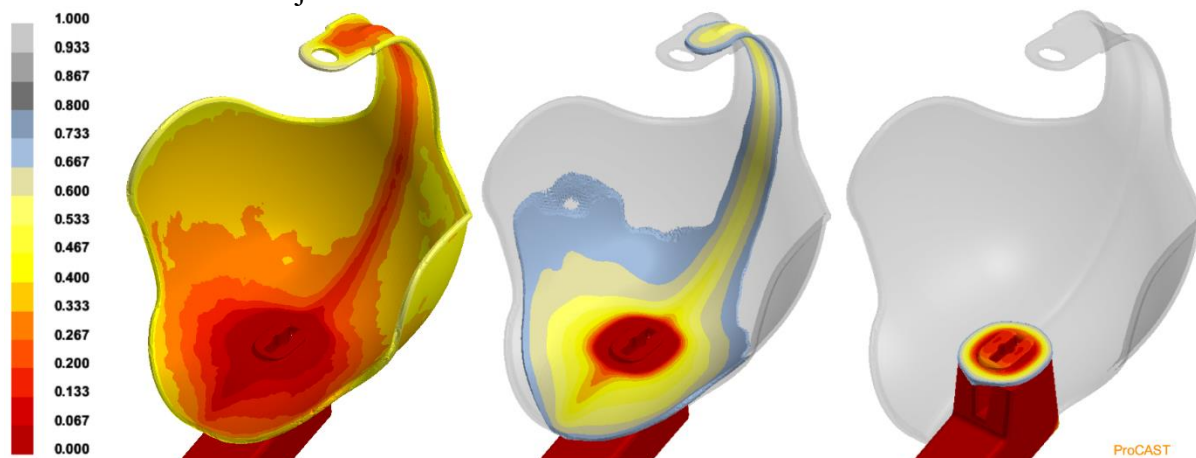
Zásadný poznatok numerickej simulácie nepozostával iba z pozorovania plnenia a samotného priebehu tohto procesu. Hlavným cieľom tohto kroku bola lokalizácia nebezpečných miest pre možné zahľtenie plynov vo forme ktoré by mali za následok takmer isté nezabehnutie kovu do celého objemu formy. Táto podmienka bola sledovaná pomocou funkcie VOID, znázorňujúcej zbytok plynov v dutine. Výsledky tohto sledovania sú znázornené na obrázku 12.



Obr. 12: Detekcia uzatvárania vzduchu vo fázy plnenia

Spôsob odvzdušnenia bol vo všetkých troch prípadoch porovnateľný a preto bol vizualizovaný iba na jednom uložení. Pri každom type vtokovania sa zbytkové plyny zachytávali v oblasti koncov postranných výstupkov koša. Tieto miesta boli označené za kritické a pre experimentálnu výrobu bolo navrhnuté vybavenie týchto bodov výfukmi, ktoré by mali eliminovať vznik uzavretých bublín plynu v dutine formy pri plnení kovom. Bolo taktiež rozhodnuté že výfukové odvzdušnenie bude aj na koncovú, tenkú časť modelu, nakoľko sa jedná o poslednú časť ktorá je zaplňaná. Z tohto dôvodu je potrebné odvzdušniť ju vo všetkých prípadoch výrobného procesu.

Za použitia numerickej simulácie plnenia formy bolo taktiež kontrolované usmernenie tuhnutia tenkostenných odliatkov. Sledovanie bodov v ktorých začne kov vo forme kryštalizovať a prechádzať do tuhej fázy je kľúčové z pohľadu vzniku porezity či sťažení. Ako je možné sledovať na obrázku 13, usmernenosť tuhnutia odliatku pri navrhovanom vtokovaní sa ukázala ako dostačujúca.



Obr. 13: Vizualizácia usmerneného tuhnutia

Výsledkom pokusu numerickej simulácie boli teda lokalizované tri kritické body a model koša bude vybavený troma výfukmi na odpovedajúcich miestach. Uloženia 1 a 3 budú zaradené do experimentálnej časti práce. Uloženie modelov s označením 2 sa ukázalo ako najmenej vhodné a riziko rozstrekú kovu pri plnení bolo zhodnotené ako zbytočné, preto sa od tohto spôsobu vtakovania v experimentálnej časti práce upúšťa.

4 VÝROBA MODELOV PRE ODLIEVANIE

Jedným z cieľov tejto práce je zavedenie možnosti prototypovej výroby dielcov na meče pre firmu SIGI forge s.r.o.. V spolupráci s Vysokým učením technickým v Brne a za využitia technológií prístupných v zlievarni prevádzkovej Oborom slévárenství je snaha vypracovať cenovo zvládnuteľnú výrobu prototypových dielcov na meče.

Výhody tejto spolupráce vyplývajú z novej flexibility pre firmu SIGI forge ktorá umožňuje testy produktov a nových materiálov bez nutnosti výroby drahých foriem na vstrekovanie vosku. Druhým veľmi cenným bonusom je možnosť výroby prototypových škrupín za veľmi krátku dobu za využitia metód Rapid Prototyping. Takýto druh výroby je veľmi vhodný pre testovacie série, vyladenie technológie pred plnou produkciou ako aj pre výrobu mečov na objednávku.

Produkcia modelov pre účely testovania technologických postupov a materiálových vlastností prebieha na tlačiarňi ORIGINAL PRUSA i3 mk3s+. To umožňuje rýchlo reagovať na podnety dizajnérov firmy SIGI forge s.r.o. a zhotovovať prototypy modelov v odpovedajúcom časovom rámci. Ako materiál pre tlač komponentov určených pre technológiu vytaviteľného modelu do keramickej škrupiny bol zvolený PolyCast™ FILAMENT NATURAL. [9] [10]

PolyCast™ je termoplastický polymér, ktorého mechanické vlastnosti prevyšujú ABS a PLA plasty. Vyniká pre svoju zvýšenú rázovú odolnosť, taktiež je flexibilný a nezmršťuje sa. Pre zlievarenské využitie má taktiež veľmi nízky obsah zbytkového popola oproti plastom ABS a PLA. V neposlednej rade je možné povrch vytlačených dielcov chemicky upravovať pomocou IPA prípravkov do skleného lesku povrchu súčiastky (layer-free). Vďaka týmto vlastnostiam je ideálny pre výrobu plastových modelov pre technológiu presného odlievania. [11]

Pri výrobe modelov ktoré vyžadujú vysokú výrobnú a povrchovú presnosť je možné spolupracovať s firmou Abc3D s.r.o., ktorá dodáva modely zhotovované strojmi ProJet 2500 IC. Tieto výťažky disponujú veľmi presným povrchom ktorý sa prejaví pri zhotovení odliatku za pomoci metódy odlievania do keramických škrupín ako extrémne presný finálny produkt bez poznateľných stôp po tlači. Táto metóda je samozrejme cenovo náročnejšia ako modely pripravované na tlačiarňi PRUSA. Týmto spôsobom bude firma SIGI forge s.r.o. taktiež v budúcnosti schopná reagovať na požiadavky zákazníkov ktorí by si chceli nechať zhotoviť meč podľa ich vlastnej špecifikácie. [12]

Kombinácia týchto procesov bude umožňovať reguláciu ceny produktu v závislosti na kvalite a materiáloch ktoré bude zákazník požadovať, taktiež to ale dáva možnosť priamo zákazníkovi navoliť si z dostupných možností nielen kvalitu povrchu na jednotlivých dieloch ale aj samotný materiál z ktorého bude jeho meč zhotovený.

Pre výrobu modelov základného tvaru priečky bola zvolená cesta výroby formy na tlakové odlievanie vosku. Napriek svojej vysokej obstarávacej cene je pri produkcii firmy SIGI forge s.r.o. nutné navýšiť počet kusov a po kalkulácii nákladov a výrobnosti bola zvolená táto varianta ako najvýhodnejšia. Hliníková tlaková forma zabezpečuje plynulú výrobu modelov pre odlievanie do škrupín s veľmi presnými rozmerovými a povrchovými toleranciami IT 10. Takto zhotovené odliatky sú obrusované len minimálne, zväčša iba leštené na finálny vzhľad po tepelnom spracovaní. [1]

Tento spôsob produkcie umožňuje udržiavať dopyt po základných mečoch štandardnej triedy pri súčasnej úspore času pre firmu SIGI forge s.r.o.. To vo svojej podstate znamená že čas nestrávený pri brúsení dielov môže byť venovaný precíznejšiemu dokončovaniu, opracovávaniu a dokončovacím úpravám meča. Z toho vyplýva celkovo lepší finálny produkt. Taktiež nesmieme pozabudnúť na tvar priečky, ktorý je možné zhotoviť v sériovej produkcii iba ako odliatok čo taktiež napomáha k diverzifikácii mečov firmy SIGI forge s.r.o. od konkurenčnej produkcie limitovanej staršími technológiami. [1]

Momentálne je výroba sériových priečok štandardných mečov limitovaná na jeden konkrétny tvar ktorý môžeme pozorovať na obrázku 14, na ktorom je zároveň doladovaná technológia samotného procesu pomocou implementácie do tvrdej praxe so zabezpečovaním spätnej väzby od pracovníkov ako aj zákazníkov. Firma SIGI forge s.r.o. má ambície ďalej rozširovať sortiment tvarov základných priečok v budúcnosti.



Obr. 14: Príklad sériovo vyrábanej priečky z materiálu 42CrMo4

4.1 Technológia 3D tlač

Trvalé formy, veľmi často zhotovované z nízkotavitelných kovov, predstavujú značné vstupné náklady pre začatie sériovej výroby. Napriek svojim nespochybniteľným výhodám sú určené skoro výhradne pre sériovú produkciu a nepredstavujú preto vhodné riešenie pre realizáciu testovacích a experimentálnych sérií odliatkov.

Pre zhotovenie modelov pre výrobu škrupín určených na testovanie ocele Maraging 200 sme ako výrobné zariadenie zvolili 3D tlač. Vývoj technológií „rapid prototyping“ sa v nemalej miere zameriava na možnosti využitia zhotovovania prototypových výrobkov priamo a bez nutnosti drahých modelov či obrábacích zariadení. Tento trend sa prejavil aj v oblasti výrobných postupov technológie presného odlievania. Za pomoci kvalitných tlačiarní a materiálov, špeciálne navrhnutých pre obaľovanie do škrupín a následné vypaľovanie sme schopný realizovať kusovú výrobu modelov. Tento proces je značne úsporný v porovnaní s klasickou technológiou výroby formy na voskový vstrekolis, pričom nemožno podotknúť rozdiel v cene jednotlivých služieb.



Obr. 15: ORIGINAL PRUSHA I3 MK3S+ [9]

3D tlač zvolená ako výrobný agregát pre zhotovovanie modelov užitých pri experimente je ORIGINAL PRUSHA I3 MK3S+. Jedná sa o najnovšiu verziu oceňovanej 3D tlače firmy PRUSHA obohatenej o najlepšiu kalibračnú technológiu zabezpečujúcu plynulý a presný tisk modelov. Tlačiareň je ilustrovaná na obrázku 15. [9] [13]

Technologicky sa jedná o takzvanú FDM metódu (Fused Deposition Modeling), kde sú vrstvy materiálu nanášané na vyhrievanú pracovnú plochu za pomoci hlavice extrudera. Filament je v tomto prípade pevné vlákno uskladnené na zásobníkovej cievke stroja. Materiál je privádzaný do tlačovej hlavice pomocou podávača, prechádzajúci cez radu senzorov ku pretlačovacej tryske kde je natavovaný a následne nanášaný na pracovnú plochu. [7]

4.2 PolyCast™

Zásadnú rolu vo výrobe modelov za pomoci 3D tlačiarne hrá zvolený materiál. Tento faktor je obzvlášť kritický ak sa jedná o diely určené pre následnú aplikáciu v procese presného odlievania.

Pre túto úlohu je nutné dôsledne zvážiť mnohé parametre filamentov, ako sú teplota tavenia, rozpínanie pri tavení a v neposlednom rade obsah zbytkových látok po vypálení modelu z keramickej škrupiny. Mnohé filamente sú nedostačujúce v mnohých zo spomínaných bodov a zanechávajú vnútorný povrch škrupín zanesený ťažko odstrániteľnými sadzami či dokonca zbytkami plastu ktoré znehodnocujú odliatky. Technológia presného odlievania je natoľko špecifická na požiadavky fyzikálnych vlastností filamentov, že firmy produkujúce filamente sa začali zaoberať touto problematikou špecificky. Výsledkom je rad produktov špeciálne vyvinutých tak, aby mali vlastnosti pri procese presného odlievania čo najpodobnejšie klasickým voskovým modelom.

Jednou z týchto firiem je spoločnosť Polymaker ktorá na trh uviedla filament PolyCast™. Tento materiál bol zvolený pre experimentálnu časť tejto práce. Vďaka svojim jednoznačným prednostiam v porovnaní s klasickými materiálmi pre 3D tlač ako sú napríklad PLA filamente je PolyCast™ skvele dimenzovaný na každý bod výrobného procesu presného odlievania. [14]

Vplyv materiálu PolyCast™ na jednotlivé kroky výrobného procesu:

1. **Zostavenie stromčekov:** stavba nie je nijak obmedzená použitím materiálu PolyCast™. Modely je možné lepiť priamo na voskové vtokové koly. Kombinácia klasických voskových modelov a dielov zhotovených z materiálu PolyCast™ je taktiež možná bez obmedzení. V prípade väčších modelov je doporučené pridať odvzdušňovacie kanály pre lepšiu únik plynov pri vypaľovaní. [11] [14]
2. **Výroba keramickej škrupiny:** pre zhotovovanie škrupín sa odporúča užitie keramických tekutín na bázy oxidu kremičitého. Neodporúča sa použitie brečiek na báze kremičitanu sodného. Počet obalov by mal byť v rozmedzí 4 až 9 vrstiev. [14]
3. **Vytavovanie/vypaľovanie:** pre odstránenie materiálu PolyCast™ z keramickej škrupiny je potrebné aplikovať na štruktúru vysoko tepelný prúd pary či vzduchu pre odstránenie voskových častí stromčeka a zachovanie čistoty vytaveného vosku. Modely z materiálu PolyCast™ zotrávajú v škrupine do bodu žihania v peci. Ak nie je prioritou zachovanie čistoty vosku a jeho následná recyklácia je možné vytavovanie vosku preskočiť a proces uskutočniť naraz v upravených žihacích peciach schopných vyvinúť tepelný šok. V oboch prípadoch materiál vyhorí. [14]
4. **Sintrácia keramických škrupín a výpal:** v prípade sintrácie sa postupuje podľa zaužívaného procesu. Popri sintrácii škrupiny sa zároveň vypália modely z materiálu PolyCast™ pretrvávajúce v škrupine či ich zbytky po výpale v peciach. Optimálne podmienky pre spracovanie škrupín s PolyCast™ modelmi je odporúčané doladiť počas výrobného procesu. [11] [14]
5. **Výplach škrupín:** prepláchnutie keramickej škrupiny vodou sa odporúča ako poistka pre odstránenie všetkých nežiadúcich zbytkov a popola po procese vypaľovania modelov z materiálu PolyCast™. Ak zlievareň zhodnotí že tento krok nie je nutný, netreba ho vykonávať, výsledky po odliati by mali byť veľmi dobré aj bez výplachu. [14]
6. **Odlievanie:** priebeh posledného kroku výroby je nezmenený a netreba ho nijak upravovať pre dosiahnutie dokonalého výsledku. [14]

4.2.1 Technológia materiálu PolyCast™

V procese 3D tlače je možné dosahovať rôznych výsledkov za pomoci technológií aplikovaných v samotnom materiály použitom pre výrobu modelov. Spoločnosť Polymaker vyvinula materiál PolyCast™ s optimálnymi schopnosťami nielen pre dobrú schopnosť vyhorenia z keramickej škrupiny, ale taktiež pre mnohé ďalšie technológie.

Prehľad technologických možností materiálu PolyCast™:

- **JAM-FREE™** technológia zlepšuje tepelnú stabilitu filamentu pri teplotách nad 140°C. Výsledkom je veľmi dobrá tavitelnosť filamentov a hladký prietok tlačiacou hlavicou s minimálnym rizikom zapchatia trysky. [14]
- **WARP-FREE™** umožňuje výrobu filamentov na báze nylónu ktorá ide tlačiť s vynikajúcou rozmerovou stabilitou. Pri procese tlače sú týmto eliminované odlúpnutia rohov z podložky či iné deformácie materiálu. [14]
- **NANO VÝSTUHY** sa aplikujú do filamentov pre zlepšenie mechanických vlastností modelov aby vydržali náročné podmienky obalovania keramickými vrstvami. Dramaticky sa tým zvýši tvrdosť modelu. [14]
- **ASH-FREE™** technológia je kľúčový bod pre proces presného odlievania. Umožňuje filamentu PolyCast™ vyhorieť z keramickej škrupiny takmer bez zbytkového popola. V porovnaní s klasickými filamentami ktorých zbytkových popol sa v optimálnom stave pohybuje okolo hodnoty 0,5% je podiel popola vo

filamentoch PolyCast™ na úrovni 0,003%. Tento markantný rozdiel zabezpečuje bezchybnú výrobu zdravých odliatkov. [14]

bez technológie Ash-Free™

obsah popolčeku: 0.5%



s technológiou Ash-Free™

obsah popolčeku : 0.003%



Obr. 16: Príklad efektu technológie Ash-Free™ [14]

- **LAYER-FREE™** je povýrobný proces zameraný na zbavenie modelu drsného povrchu spôsobeného 3D tlačou. Proces pozostáva z expozície modelu izopropylalkoholu (IPA). Izopropylalkohol sa aplikuje buď v špecializovaných aerosólových prístrojoch alebo pomocou kúpele kde sa model nechá ponorený celým objemom po dobu 30 sekúnd. Pri horších miestach dielov je odporúčané povrch pred ponorením do kúpele obrúsiť brúsnym papierom pre dosiahnutie najlepších výsledkov. [14]

Drsný povrch



Technológia
Layer-Free™



Obr. 17: Vizualizácia technológie Layer-Free™ [14]

4.3 Výroba experimentálnych modelov

Praktická časť tejto práce pojednáva o využití materiálu Maraging 200 pre výrobu dielcov pre športové HEMA meče. Objednávateľ projektu, firma SIGI forge s.r.o., taktiež požadovala doplňujúce testy a porovnanie materiálových vlastností pre už používané druhy ocelí s oceľou Maraging 200. [1] [4]

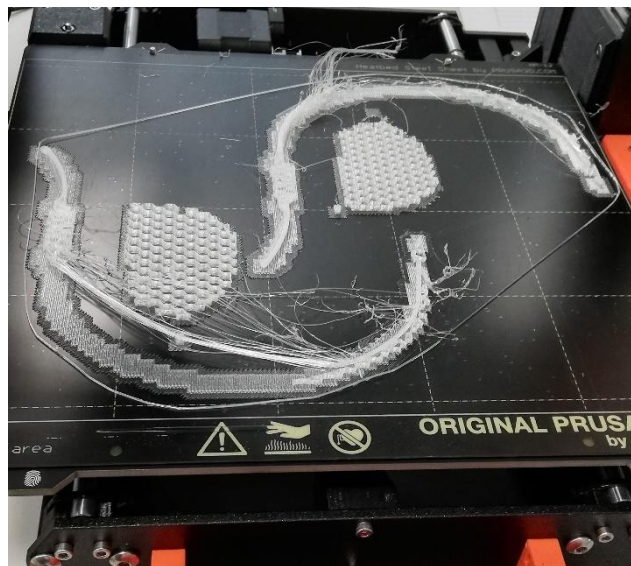
Obsah časti práce venovanej výrobe experimentálnych súčiastok bude tvoriť predstavenie modelov zvolených ako testovacie vzorky. Tie boli dodané priamo firmou SIGI forge s.r.o., pričom niektoré z modelov sa paralelne vyrábajú v iných závodoch z materiálov ktorých

vlastnosti sú východným porovnávacím bodom pre dielce zhotovené z oceli Maraging 200. Jednotlivé štruktúry budú popísané z ohľadu na ich tvarové vlastnosti a zlievarenskú náročnosť pri realizácii výrobného procesu. Vzhľadom na jedinečnú možnosť výroby súčastí z experimentálneho materiálu Maraging 200 boli ku štandardne dohodnutým dielcom pridané ďalšie výrobky od firmy SIGI forge s.r.o.. Jedná sa taktiež o experimentálne, prototypové dielce na ktorých sa budú testovať limity materiálu z pohľadu zbiehavosti, tvarovej presnosti či lešiteľnosť povrchu odliatku po opieskovaní, ktorá hrá kľúčovú rolu pri výrobe pohľadových výrobkov. [1] [6]

Pre realizáciu vyhotovenia produktov potrebných pre experiment bola použitá, už spomínaná, tlačiareň ORIGINAL PRUSHA I3 MK3S+. Tento stroj bol pred experimentom skalibrovaný a nastavený pre zabezpečenie čo možno najlepších podmienok tlače. Materiál filamentu od firmy Polymaker zaistoval ideálne predpoklady pre výrobu plne funkčných modelov kompatibilných s voskom. Základom správneho prevedenia tavby bola správne vyladená technológia medzi použitým voskom a modelmi zhotovenými pomocou tejto technológie. [13] [14]

Prvým zhotovovaným modelom sa stal kôš pre šabl'u. Vzhľadom na tenkostennosť a tvar dielca sme zvolili postup rozdelenia koša naprieč stredovým rebrom. Tento krok zabezpečil lepšie podmienky pre tlač vďaka redukcii podpier nutných pre jej realizáciu, taktiež sa rapídne zvýši presnosť povrchov ktoré sú zhotovované ako vrchné vrstvy modelu a sú oslobodené od podporného materiálu, ktorý po odlomení zanechá na povrchu nepravidelnú a citelnú hrubú štruktúru. Problém, ktorý týmto rozdelením avšak nastal bola veľmi úzka styčná plocha samotného modelu s tlačovou podložkou spôsobujúca komplikácie v priľnavosti pri tlači.

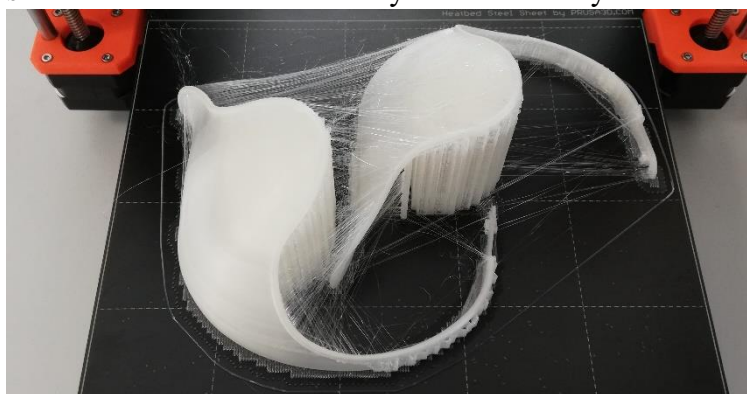
Pre nastavenie podmienok tlače sme vychádzali z nastavení pre materiál PLA. Tento postup je odporúčaný samotným výrobcom PolyCastu™, no navzdory tomu sme boli nútení jemne doladiť parametre pre našu výrobu. Materiál PolyCast™ mal počas prvej fáze tlačového procesu problém s neprilepovaním sa na plochu dostatočne silno pre udržanie nadväzných vrstiev a pri zhotovovaní priemerne piatej vrstvy sa model od podložky odtrhol a tlač sa musela kompletne prerušiť. Prvým návrhom zmeny bolo použitie novej tlačovej podložky od firmy



Obr. 18: Chyba pri tlači modelu koša šable

PRUSHA. Tento typ disponuje drsným povrchom ktorý mal, teoreticky, napomáhať v priľnutí prvých vrstiev modelov. Po praktickom teste bol tento predpoklad pre materiál PolyCast™ nesplnený. Vznikal rovnaký problém odlepovania základne modelu ako pri bežnej podložke dodávanej priamo s 3D tlačou. Pre druhý pokus bol na povrch drsnej podložky nanesený film lepidla odporúčaného pre použitie s tlačovými podložkami PRUSHA. Výsledok bol porovnateľne nevyhovujúci ako pri pokusoch s čistou pracovnou plochou. Príklad zlyhaného procesu 3D tlače je znázornený na obrázku 18, v tomto konkrétnom prípade bola použitá bežná podložka dodávaná z 3D tlačiarňou. [14] [15]

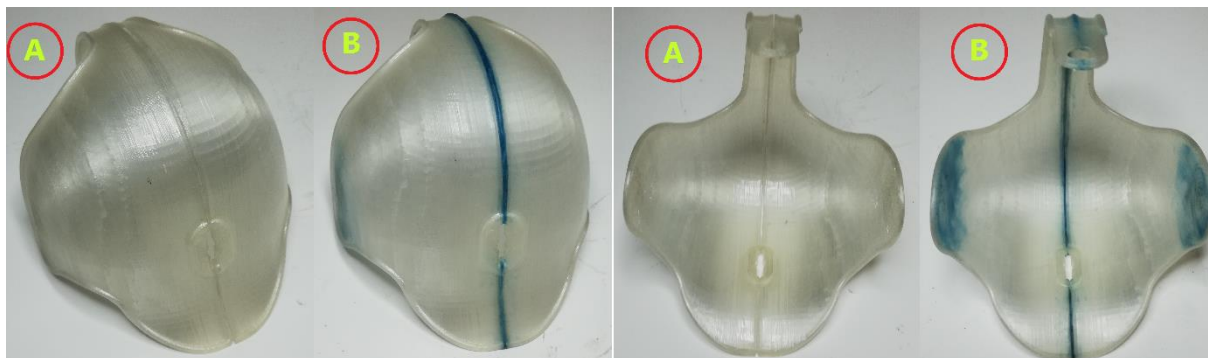
Riešenie tejto problematiky prišlo v podobe úpravy viacerých krokov tlače. Hrúbka tlaču bola zväčšená na 0,10 mm z najdetailnejšieho možného nastavenia 0,07mm. Táto zmena bola zvolená pre zvýšenie množstva materiálu ktorý bude mať väčšiu masu na lepšie priľnutie ku predošlej vrstve. Teplota tlačovej podložky bola zdvihnutá na 60°C pre dobu celého procesu. Teplota Extrudera bola navýšená na 215°C. Zámerom tejto zmeny bolo prehriať materiál opúšťajúci trysku tlačovej hlavice natoľko, aby sa pevne spojil s predchádzajúcou vrstvou. Pre celý proces bola taktiež zvýšená miera chladenia hlavným ventilátorom na 150% ako kompenzácia nadmerného nahrievania materiálu pre jeho rýchlu fixáciu a spojenie s materiálom za súčasného vychladnutia a vytvrdnutia. Ako finálna úprava bol celý model



Obr. 19: Dokončený výtláčok koša šable

boli schopní zhotoviť obe polovice modelu pre kôš šable. Komplikáciou pri zhotovovaní modelov z materiálu PolyCast™ je výskyt sieťovej štruktúry podobnej pavučine na modeloch spôsobených vlečením zbytkového materiálu pri pohybe tlačového Extrudera. Tento problém je možné taktiež pozorovať na obrázku 19.

Dokončovacie úpravy modelu započali odstránením modelu z tlačovej plochy a precíznym odlomením podporného materiálu. Odstránenie pavučinovej štruktúry sme dosiahli cieľným ofúknutím horko vzdušnou pištoľou. Pri tomto procese sa vlákna pavučín stiahnu a zabalia do guľčiek. Tie boli už jednoducho odstrániteľné pri brúsení povrchu brusnými papiermi. Pre prídavné zjemnenie štruktúry boli použité brúsne papiere o drsnosti P120. Obe polovice modelu boli opracované brúsením a následne zlepené za použitia lepidla na plasty. Tento proces vyžadoval odstátie modelov pre úplnosť chemickej reakcie v lepenej časti približne na 2 hodiny. Nadväzným krokom procesu dokončovania modelu bolo lúhovanie v kúpeli z alkoholu IPA. Doba ponechania modelu v kúpeli predstavovala 30 sekúnd. Diel bol následne umiestnený pred ventilátor, ten zabezpečil ofúknutie kvapiek alkoholu IPA zostávajúcich na modeli a zároveň napomáhal k odpareniu prebytku alkoholu pre jemnú a rovnomernú leptanú povrchu. Model po týchto krokoch je možné pozorovať na obrázku 20 v častiach označených písmenom „A“. Povrch nadobudol po týchto procesoch jemnú drsnosť na dotyk pripomínajúcu sklo.



Obr. 20: Postup výroby modelu koša šable z materiálu PolyCast™

Ďalšou nevýhodou tlače, pri použití podkladových vrstiev, je fakt, že znehodnocovali tvar stredového rebra koša. Toto rebro bolo v závere dokončovacích operácií ručne domodelované na povrch dielu pomocou modelárskeho vosku Blayson A7-208. Tento proces bol taktiež aplikovaný na miesta poškodené podporným materiálom ktoré disponovali veľkou drsnosťou aj po brúsení povrchu súčiastky. Tieto úpravy zahrnovali doplnenie vrstvy vosku do spodných častí koncov profilov šable, ku ktorým boli napojené veľké segmenty podpory, nesúce model pri procese výroby. Taktiež bola vyplnená vnútorná plocha medzery ktorá vznikla pri zlepení vytlačených polovic modelu. V poslom rade bolo opravované miesto diery na konci úzkeho profilu zakončenia šable. Finalizovaný produkt je možné pozorovať na obrázku 20 v častiach označených písmenom „B“.

Doplnkovým dielom vyrábaným procesom 3D tlače boli tvarové záštity mečov. Pre zachovanie kvality povrchových vrstiev modelu bolo taktiež zvolené rozdelenie súčiastky v rovine stredu modelu. Tlač dielu prebehla bez komplikácií nakoľko styčná plocha súčiastky s tlačovou podložkou 3D tlačiarne umožňovala veľmi dobré priľnutie filamentu PolyCast™. Týmto spôsobom boli zhotovené dva kusy priečok. Po očistení od podporného materiálu a zlepení bolo uskutočnené leptanie v alkohole IPA po dobu 30 sekúnd. V poslednom kroku prípravy modelov bola na deliacu rovinu modelu nanosená vrstva modelárskeho vosku pre



Obr. 21: Model tvarových priečok meča

doplnenie a zjednotenie tvaru. Pri zhotovovaní bol kladený dôraz na povrchovú presnosť ako je možné pozorovať na obrázku 21, pre dosiahnutie čo najlepšieho výsledku samotných odliatkov.

Všetky ostatné modely boli dodávané priamo firmou SIGI forge, ktorej boli poskytnuté výrobné

procesy a informácie pre zhotovovanie vlastných modelov z materiálu PolyCast™. Prevzaté výťažky boli opracovávané brúsením. Taktiež na nich bolo uskutočnené leptanie povrchu a doplnenie celistvosti profilu modelovacím voskom Blayson A7-208.

5 POROVNANIE MATERIÁLOV

Nasledujúca časť práce bude bližšie popisovať jednotlivé druhy materiálov používaných pri výrobe mečov firmy SIGI forge s.r.o.. Je nutné položiť do perspektívy všetky faktory ovplyvňujúce finálny produkt aby sme mohli objektívne popísať a zhrnúť všetky zmeny ktoré prechod k novej technológii prinášajú. Ako bolo spomínané, momentálne sa nahrádza pôvodný materiál používaný na výrobu priečok a hlavíc mečov Weldom 700. Ten je nahradzaný odlievaným 42CrMo4. Z tohto materiálu sú taktiež zhotovované čepele. Posledný materiál, navrhnutý ako vývojový krok v procese samotného odlievania, je Maraging 200. Kov ktorý je predmetom výskumu a vývoja technológie spracovania tejto správy. [6] [16] [17]

Predmetom rozboru týchto troch materiálov bude ich prínos pre technológiu v rámci ktorej boli implementované do procesu výroby, ich výhody pri obrábaní, možnosti využitia a technologický posun ktorý ponúkajú pre budúci rozvoj výroby firmy SIGI forge s.r.o.. Ďalšie kritéria zohľadnené pri zrovnaní sú taktiež cena samotného materiálu a cena spracovania. Veľmi dôležitým faktorom zostáva taktiež náročnosť prípravy materiálu a schopnosť implementácie daného kovu do veľkosériovej výroby.

5.1 Nároky kladené na materiál

Základným predpokladom pre úspešné nahradenie dielov zhotovovaných pomocou laserového vypaľovania a následného obrábania je zaistenie vlastností v porovnateľnej alebo dokonca lepšej kvalite ako poskytujú takéto materiály. Diely zhotovované technológiou odlievania všeobecne nedisponujú potenciálom na prekonanie svojej konkurencie v ohľade na materiálové charakteristiky. Napriek týmto faktom je stále nevyhnutné zabezpečiť kvalitu a pevnosť dielov pre ich použitie v praxi. Pre tento problém sa vývoj ďalšieho smerovania výroby dielov zameriaval na implementáciu materiálov ako je Maraging 200, ktorý má potenciál vyrovnat' sa výrobkom z tváraných materiálov po mechanickej stránke aj vo svojom odlievanom stave. Pri splnení týchto požiadaviek je táto cesta ideálna pre vyhotovenie veľmi spoľahlivých dielcov pre meče. Veľkou výhodou taktiež zostáva tvarová rozmanitosť ktorú do výrobného procesu vnáša technológia odlievania.

Základne používané materiály budú porovnané z pohľadu ich obrábateľnosti v odlíatom stave v porovnaní s východným materiálom Weldom 700. Taktiež bude kladený dôraz na ich zvariteľnosť a lešiteľnosť ako jedny z kľúčových vlastností pre realizáciu pohľadových častí mečov.

5.2 Weldom 700

Materiál Weldom 700 bol zvolený pre výrobu priečok prvotnou technológiou, vypaľovaním z plechových polotovarov. Ide o jednoduchý proces na ktorý nadväzuje množstvo dokončovacích operácií pri už zmieňovanom postupe výroby za užitia takto zhotovených dielov.

Weldom 700 je termochemicky spracovaná oceľ používaná na rôzne dielce pre úžitkové stroje a techniku. Ide o pevný materiál dosahujúci nosnosť až 700N/mm². Weldom 700 sa dodáva upravený na vlastnosti garantujúce nárazovú pevnosť až do teplôt -60°C. V tabuľke 1 je uvedené chemické zloženie materiálu Weldom 700. [16] [18]

Tabuľka 1: Chemické zloženie materiálu Weldom 700 [16]

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Cu (%)	Ni (%)	Mo (%)	B (%)
Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max
0,20	0,60	1,60	0,020	0,010	0,70	0,30	2,0	0,70	0,005

Weldom 700 dosahuje svoje vlastnosti po procese nazývanom riadené valcovanie. Ochladzovaním na vzduchu vzniká v materiály jemná štruktúra tvorená Feritom a horným bainitom. Pri zrýchlenom ochladzovaní pri nízko uhlíkatých oceliach vzniká štruktúra tvorená jemným ihlicovým feritom a disperzne vylúčenými ostrovčekmi feritu alebo bainitu. Jednou z nevýhod materiálu avšak patrí fakt, že pri dlhodobom vystavení vysokým teplotám v okolí 580°C začína byť materiál nestabilný a jeho mechanické vlastnosti sa rapídne zhoršujú, preto sa neodporúča užívanie dielov z Weldomu 700 za zvýšených prevádzkových teplôt. [16]

Pre použitie na výrobu priečok mečov pre firmu SIGI forge s.r.o. boli hlavné vlastnosti materiálu jeho výborná pevnosť, zvariteľnosť. Komponenty zhotovené z tohto materiálu majú taktiež obmedzené ohybové vlastnosti za studena, čo dovoľuje úpravu tvaru priečky podľa požiadavkou zákazníka. Tento proces je však značne obmedzený. Ďalším značným problémom materiálu je jeho neschopnosť tvárnenia. Termochemické spracovanie štruktúry Weldomu 700 ktoré vzniká už pri výrobe ocele sa pod vplyvom tepla degraduje a z tohto dôvodu je takmer nemožné materiál tvárniť. [16] [18] [19]

Ďalším veľkým problémom priečok zhotovených z tohto materiálu je fakt že napriek svojej značnej pevnosti nie je dostatočne tvrdý aby odolával dlhodobému pôsobeniu ostria čepele. V praxi to znamená že priečka začne byť po istej dobe aktívneho používania „osekaná“

a vytvoria sa na nej nepríjemné zárezy. Tieto poškodenia dielu sú jeden z hlavných dôvodov snahy vývoja tvrdších priečok, ktoré by boli schopné dlhodobo odolávať opotrebeniu počas svojej životnosti. Naštípené miesta nielen že pôsobia ako koncentratory napätia ktoré mnohonásobne zvyšuje riziko únavovej trhliny ale zároveň predstavuje aj manipulačný problém pre samotného užívateľa meča. Záseky sú v mnohých prípadoch ostré a na dotyk či pri neopatrnom zaobchádzaní s takto opotrebovaným mečom môžu spôsobiť rezné zranenia zákazníkovi. Netreba dodávať že tento stav produktu je vysoko nežiadúci. Pre ilustráciu problému je priložený obrázok 22 na ktorom sú tieto poškodenia zjavne viditeľné.



Obr. 22: Zničená priečka z materiálu Werdox 700

Firma SIGI forge s.r.o. preto upriamuje svoje zameranie na materiály a technológie ktoré budú nielen splňovať vysoké nároky na kvalitu finálnych dielov a harmonické fungovanie so zbytkom meča, ale prinesú aj zlepšenie v oblasti bezpečnosti prevádzky a manipulácie s produktom ako pre užívateľa tak aj pre ostatných účastníkov športových aktivít. [1]

5.3 EN 42CrMo4

Nízko legovaná ušľachtilá chróm-molybdénová oceľ predstavuje základný materiál pre výrobu čepelí mečov. Vďaka svojim vyhovujúcim vlastnostiam po kalení a temperovaní sú z EN 42CrMo4 zhotovované čepele pre všetky produkty firmy SIGI forge s.r.o.. Tento kov disponuje dobrou pevnosťou a húževnatosťou po tepelnom spracovaní. V tabuľke 2 je uvedené chemické zloženie chróm- molybdénovej ocele EN 42CrMo4. [17] [20]

Tabuľka 2: Chemické zloženie materiálu EN 42CrMo4 [20]

C (%)	Si (%) Max	Mn (%)	P (%) Max	S (%) Max	Cr (%)	Mo (%)
0,38- 0,45	0,40	0,6- 0,9	0,025	0,035	0,90- 1,20	0,15- 0,30

Jedná sa o oceľ s vyššou prekaliteľnosťou pre viac namáhané strojné súčiastky. Po zakalení je možné dosiahnuť tvrdosť až 58 HRC. Do priemeru približne 100 mm je možné doceliť pevnosť až 1000 Mpa pri zachovaní dostatočnej húževnatosti. Táto oceľ nie je náchylná na popúšťaciu krehkosť. Avšak vzhľadom na náchylnosť ku vytváraniu kaliacich trhlín v miestach s vrubovým účinkom, je nutné toto tepelné zapracovanie uskutočňovať do menej razantných kaliacich médií. Tento efekt má taktiež za následok pomerne zlú zveriteľnosť materiálu. V kalenom stave dobre odoláva opotrebeniu. Oceľ sa zväčša obrába v stave žíhanom na mäkkú. Pri nižších pevnostiach je možné obrábať aj pri zušľachtenom stave. Zvýšenú obrobiteľnosť vykazuje oceľ s vyšším obsahom Síry. [20] [21] [22]

Čepele mečov sú vyrábané z valcovaného plechu o hrúbke 4 až 6 milimetrov, výnimočne až do 8 až 10 milimetrov, ktorý je rezaný laserom do požadovaného tvaru a rozmerov pre

zhotovenie dielcov. Hrubé výrezky sú následne ručne opracované do finálneho tvaru brúsením a leštením. Čepel s tŕňom tvoria kosť celého meča, preto sú na nich kladené veľké nároky v ohľade na presnosť a kvalitu spracovania.

Po snahe o modernizáciu výrobného procesu a zlepšenie efektivity práce sa pre novú metódu presného odlievania zvolil práve EN 42CrMo4 ako východzí materiál pre série odliatkov. Pri začatí procesu sa materiál ukázal ako dostatočne zabiehavý s dobrým povrchovým vzhľadom po odliatí. Vzhľadom na zmenu technológie je však nutné počítať s množstvom odlišných vlastností pri porovnávaní materiálu valcovaného a odlievaného.

Jednou z najväčších nevýhod materiálu je jeho pomerne obmedzená zvarateľnosť. Taktiež je nutné materiál predhriať aspoň na teplotu 200-300°C. Pri predohreve taktiež hrozí strata či poškodenie chrómovej vrstvy pri prekročení maximálnej odporúčanej teploty. Ak by pri apretúre odliatku alebo jeho dokončovaní priamo vo výrobe došlo ku poškodeniu, nie je možné poruchy opraviť. [21] [23]

Výrobou súčiastok z materiálu EN 42CrMo4 bola poverená tretia strana, zlievareň presných odliatkov v Trenčíne ktorá taktiež dodala potrebné vzorky pre testy materiálových vlastností. Pri procese odlievania sa v niektorých sériách priechok vyskytli mikro-trhliny spôsobujúce rapídne zníženie pevnosti a húževnatosti dielu ktoré zapríčinili nepoužiteľnosť veľkého množstva dodaných produktov. Podľa identifikácie problému sa jedná o tuhnutie odliatkov



Obr. 23: Lom priečky z materiálu 42CrMo4

v škrupine bez dostatočného povolenia zo strany formy pri zmršťovaní, ktoré má za následok vznik väd v ostrých bodoch voskového modelu, fungujúcich ako koncentrátoři napätia. Následná úprava zameraná na odstránenie tohto problému viedla k rozšíreniu vtoku do odliatku pre lepšie usmernenie tuhnutia a tým zabránenie vzniku napätia pri prechode materiálu do fáze solidu. Na obrázku 23 je znázornená jedna z inkriminovaných priečok po záťažovom teste vo firme SIGI forge s.r.o.. Ako je možné pozorovať, v rohoch sú jasne viditeľné trhliny z ktorých sa šíry krehký lom po ploche odliatku. Tento problém je nutné zahrnúť do problematiky vývoja experimentálnych Maragingových odliatkov v realizovanom experimentálnej časti práce.

5.4 Maraging 200

Pre experimentálny vývoj práce bol zvolený materiál Maraging 200. Ide o jeden z najpevnejších homogénnych materiálov. Tento materiál bol odvodený od základného typu zliatiny Fe-18%Ni delegovaním Kobaltu, Molybdénu, Titánu a Hliníku. Tieto oceli dosahujú vynikajúce pevnosti najmä vďaka precipitačne vylúčenému Niklovému martenzitu pri starnutí. [6] [24]

Maraging je značne využívaný v leteckom priemysle vzhľadom na svoje fantastické vlastnosti. Označenie Maraging sa skladá zo slov MARTenzite, čo je veľmi pevná kryštalická štruktúra železa a AGING (starnutie) ktorým sa dáva najavo hlavné tepelné spracovanie výrobkov z tejto oceli. Vzhľadom k nízkym obsahom uhlíku vzniká po zakalení štruktúra mäkkého „niklového“ Martenzitu. Následným vytvrdzovaním pomocou precipitačného starnutia pri teplotách v okolí 500°C dochádza ku prudkému spevneniu ocele. Pri tomto procese rastie medza klzu na zhruba 2,5 násobok pôvodných hodnôt. [6] [25]

Maraging má v odlíatom stave vynikajúcu spracovateľnosť. V dôsledku svojej prvej mäkkosti pred tepelným spracovaním a s tým spojenú vynikajúcu obrábateľnosť

a zvárateľnosť, čo umožňuje širokú škálu procesov či už opravného alebo konštrukčného charakteru. Taktiež nie je nutné zväť Maraging 200 s predohrevom. [26]

Materiálové vlastnosti Maragingu 200 zahrňujú vysokú ťažnosť a medzu pevnosti v ťahu. Vysokú medzu únavy, tvrdosť pri zachovaní ťažnosti spolu s veľmi dobrou odolnosťou. Veľmi významnou vlastnosťou pre použitie tohto materiálu na súčiastky mečov je aj jeho odolnosť voči nárazovému zaťažovaniu. Ďalšiu vynikajúcou vlastnosťou je jeho vysoká lešiteľnosť, to je samozrejme jedna z primárnych požiadaviek firmy SIGI forge, nakoľko sa z materiálu Maraging vyrábajú pohľadové dielce ktoré musia odpovedať vysokým nárokom na vizuálny štandard zaužívaný vo výrobkoch. [25] [27]

Vlastnosti tepelného spracovania patria taktiež medzi prednosti materiálu. Za zmienku stojí veľmi uniformné a dobre odhadnuteľné zmrštenie pri spracovaní a minimálne deformácie počas týchto procesov. Tento fakt vychádza z nízkej teploty potrebnej pre samotné spracovanie ak je vynechané kalenie a aplikuje sa priamo proces starnutia ocele. [26]

Ocele Maraging sú sprevádzané mnohými výrobnými problémami. Ich veľká rarita spolu s náročnosťou na výrobu majú za následok nedostatočné dáta pre ich presné tepelné spracovanie a výrobu. Jedným z cieľov práce preto zostáva identifikovať správny postup pre prípravu odliatkov a ich následné spracovanie, vyrobených z materiálu Maraging 200 pre dosiahnutie optimálnych hodnôt mechanických vlastností požadovaných firmou SIGI forge s.r.o.. Taktiež bude vypracovaná schéma postupu spracovania spolu s postupom tavenia pre vývoj komplexnej technológie zhotovovania odliatkov. V tabuľke 3 je uvedené chemické zloženie materiálu Maraging z ktorého budeme vychádzať v experimentálnej časti práce.

Tabuľka 3: Chemické zloženie materiálu Maraging 200

C (%)	Al (%)	Ti (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Co (%)	Ni (%)	Mo (%)	B (%)
Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max
0,03	0,10	0,20	0,10	0,03	0,01	8,50	18,0	3,0	0,003

Napriek všetkým nespochybniteľným prednostiam ktoré materiál Maraging poskytuje, má aj tento kov svoje úskalí. Jednou z hlavných prekážok na ktorú naráža výroba väčších sérií je fakt, že sa jedná o pomerne ťažko vyrobiteľnú ocel s náročným procesom tavby vo vákuovanom indukčnom agregáte. Ďalším problémom sú taktiež legúry potrebné pre korektnú prípravu Maragingu. [28] [29]

Všetky tieto faktory sa nekompromisne odrazia na finálnej cene odliatku. Výrobky zhotovené v tomto prevedení sú jednoznačne mechanicky nadradené svojim kolegom z iných materiálov no problematika výroby a cena hrajú dôležitú úlohu pri implementovaní nových produktov do predajného sortimentu firmy SIGI forge s.r.o.. Napriek tomu že plány do budúcnosti sú zamerané na postupný prechod ku týmto kvalitným materiálom 21. storočia, v tomto bode sa proces nachádza iba v prvotnej, experimentálnej časti. Po vyvinutí technológie pre tento kov a vypracovanie správneho postupu spracovania je v pláne implementovať výrobu mečov s Maragingovými dielmi ako exkluzívnu radu produktov ktorá bude dopĺňať klasický sortiment produktov firmy SIGI forge s.r.o. skôr ako ho priamo nahradzovať.

5.5 Porovnanie mechanických vlastností používaných materiálov

Pre objektívne zhodnotenie používaných materiálov boli do projektu zahrnuté taktiež skúšky mechanických vlastností. Experimentálny materiál Maraging 200 bol v prvom kroku testovaný pre vyhotovenie optimálneho postupu tepelného spracovania pre odliatky. Korektné tepelné spracovanie je nevyhnutná podmienka pre správne mechanické vlastnosti výsledného produktu. Tento segment bol spracovaný pre vzorky žíhané, ako aj vzorky spracovávané iba starnutím, nakoľko bolo nutné zistiť vlastnosti tenkostenných odliatkov ktoré nemohli byť žíhané na

teplotu 1000°C. Následne boli z materiálu Maraging 200 zhotovené sady vzorkov určených na trhaciu skúšku ako aj sady z odlievaného materiálu 42CrMo4 pre zrovnanie vlastností týchto dvoch materiálov.

5.5.1 Tepelné spracovanie materiálu Maraging 200

Tepelné spracovanie materiálu Maraging 200 bolo jedným zo zásadných problematík diplomovej práce. Nutnosť dosiahnutia minimálnej tvrdosti 46 až 48 HRC je podmienka pre možnosť úspešného zaradenia výrobkov z tohto materiálu do prevádzky. Pri návrhu experimentu boli taktiež zahrnuté testy zohľadňujúce výrobu tenkostenných odliatkov. Tie, ako už bolo spomínané, nie je možné zakaliť na klasické teploty spracovania materiálu Maraging 200. Pri kaliacej teplote 1000°C sa na povrchu odliatku vytvoria okuje ktoré efektívne zničia povrch súčiastky a zdegradujú mechanické vlastnosti výrobku. Tento fakt je dôvodom prečo boli do experimentu zaradené testovacie vzorky upravované iba pomocou procesu starnutia, bez kalenia. [26] [30]

Spracovanie materiálu Maraging 200 nie je triviálna záležitosť a proces vytvrdzovania veľmi závisí na správnom chemickom zložení odliatkov. Korektné prevedenie tepelného spracovania na výrobkoch sa radí medzi znalosti úzko strážené medzi podnikmi zameriavajúcimi sa na tieto druhy dokončovacích operácií, preto bol zvolený experimentálny prístup pre stanovenie optimálneho nastavenia procesu starnutia pre odliatky vyrobené v rámci tohto projektu. Mnohé pramene pracujú s teplotným rozsahom od 400°C do teplôt 500°C. niektoré uvádzajú optimálne výsledky až pri dosiahnutí hranice 600°C. Avšak pri výsledkoch týchto spracovaní narážame v publikácia a výrobných listov dodávateľov na pomerne veľký rozptyl hodnôt dosiahnutých týmito úpravami. Niektoré zdroje uvádzajú možnosť dosiahnutia tvrdosti ocele Maraging 200 po tepelnom spracovaní až na hodnotu 52 HRC. V iných výrobných listoch je uvedený rozptyl tvrdostí od 45 do 50 HRC. Niektorí výrobcovia dokonca uvádzajú hodnotu 45 ako hraničný bod tvrdosti ktorý je materiál schopný dosiahnuť. Z dôvodu týchto nejednotných informácií bolo spracovanie ocele Maraging 200 testované priamo pre odliatky zhotovované v rámci projektu. [31] [32] [33]

Pre testy boli zhotovené telieska na meranie tvrdosti o rozmeroch 3x3x1 centimeter. Týchto teliesok bolo spolu osemnásť. polovica teliesok bola podrobená ohrevu na 1000°C po dobu jednej hodiny a následne ochladená vo vodnom kúpeli. Druhá polovica vzoriek bola ponechaná v odliatom stave. Následne boli všetky skupiny vložené do pecí na proces starnutia. Testovacie teploty boli zvolené na 400°C pre tri kalené a tri nekalené vzorky. Pre druhú skupinu vzorkov bola zvolená teplota 500°C, taktiež pre tri kalené a tri nekalené vzorky. Posledná skupina bola testovaná pri teplotách až 600°C, rovnako v kalenej a nekalenej sústave vzorkov. Testovacie telieska boli do pecí umiestňované v trojiciach pre overenie časovej závislosti na vplyve procesu starnutia na materiál Maraging 200. prvé kocky boli odstavené po 2 hodinách spracovania. Následne boli odstavené ďalšie testovacie telieska po 3 hodinách a nakoniec boli odstavené aj ostatné vzorky po 4 hodinách procesu starnutia. [33]

Týmto spôsobom sme sa dopracovali ku šiestim vzorkovým skupinám: telieska kalené a starnuté na 400°C, telieska kalené a starnuté na 500°C, telieska kalené a starnuté na 600°C, telieska nekalené a starnuté na 400°C, telieska nekalené a starnuté na 500°C a telieska nekalené a starnuté na 600°C.

V každej tejto skupine vzoriek sa nachádzali tri telieska, znázorňujúce postupné starnutie po dobu dvoch, troch a štyroch hodín pre každú vzorku. Takto spracované kocky boli vyleštené na brúse a podrobené testu tvrdosti podľa Vickersa. Meranie tvrdosti prebiehalo ako séria troch vpichov do každého testovaného telieska, z ktorých bol vypočítaný aritmetický priemer meraných hodnôt. Výsledky merania tvrdostí HRC sú znázornené v Tabuľke 4.

Tabuľka 4: Meranie tvrdosti materiálu Maraging 200

HODNOTY HRC	Tvrdosť vzorky v odliatom stave bez TZ: 30,1 HRC					
časy	2 hodiny		3 hodiny		4 hodiny	
Teploty	<i>kalené</i>	<i>nekalené</i>	<i>kalené</i>	<i>nekalené</i>	<i>kalené</i>	<i>nekalené</i>
400°C	39,8	40,3	40,1	40,8	40,8	41,1
500°C	41,1	42,2	41,5	42,0	42,2	41,8
600°C	30,8	31,6	31,1	31,8	31,5	31,5

Ako je možné pozorovať v tabuľke 4, hodnoty tepelného spracovania sa pri rozdielnych teplotách značne líšili. Hodnoty spracovania materiálu pri teplotách 600°C sa ukázali ako príliš vysoké. Ku procesu starnutia štruktúry materiálu precipitačným vytvrdzovaním dochádzalo iba minimálne. Lepšie sa ukázalo tepelné spracovanie materiálu pri 400°C kde boli nameraná hodnoty nárastu tvrdosti HRC na 120% pôvodnej hodnoty meranej na vzorke v odliatom stave ktorá bola 30,1 HRC. Ako optimálne spracovanie ďalších vzorkov bola zvolená kombinácia ohrevu na 500°C po dobu 4 hodín a následné pozvoľné ochladzovanie na vzduchu. Pri tomto tepelnom prevedení procesu starnutia sme boli schopný zo vzorkov vyhotovených počas tavieb ocele Maraging 200 dosiahnuť hodnotu tvrdosti približne 42 HRC.

Je nutné poznamenať fakt že žiadna vzorka nedosiahla hodnotu 45 HRC pri overovaní procesu tepelného spracovania. tento problém vo veľkej miere súvisí s odchýlkami od optimálneho chemického zloženia pri odlievaní vzorkov. Táto problematika je ďalej rozvinutá v závere práce.







Z tabuľky 4 je taktiež možné sledovať malý rozdiel medzi tvrdosťami dosiahnutými pri vzorkách spracovaných kalením a v prípade absencie tohto kroku. Tento výsledok bol hodnotený ako priaznivý pre možnosť lepšieho tepelného spracovania tenkostenných odliatkov ktoré nemôžu byť podrobené kaleniu z teplôt 1000°C.

5.5.2 Vyhodnotenie ťahových skúšok

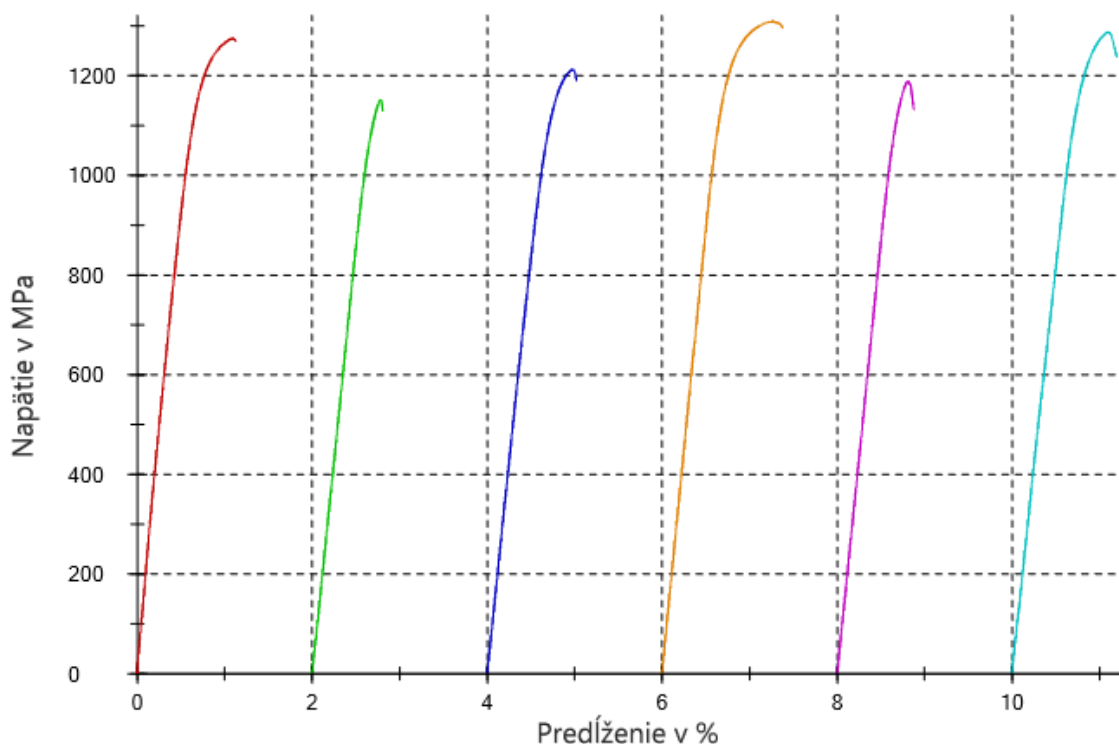
Pre overenie celkového vplyvu týchto rozdielov na mechanické vlastnosti materiálu boli zhotovené dve sady testovacích teliesok pre ťahovú skúšku. Jedna z týchto skupín testovacích teliesok bola ešte v podobe odliateho polotovaru ohriata na teplotu 1000°C po dobu jednej hodiny a následne kalená vo vodnom kúpeli. Tento proces odpovedá odporúčanému postupu tepelného spracovania ocelí Maraging 200. Druhá skupina vzorkov bola opracovaná v odliatom stave.

Každá séria obsahovala 3 vzorky. Obe sady boli tepelne spracované na 500°C po dobu štyroch hodín, čo sa ukázalo ako optimálna kombinácia hodnôt pre dosiahnutie maximálnej tvrdosti vzorkov. Po dokončení tepelného spracovania oboch skupín vzorkov bola realizovaná ťahová skúška. Výsledné hodnoty testov sú zaznamenané v tabuľke 5.

Tabuľka 5: Mechanické vlastnosti materiálu Maraging 200

Legenda	Specimen ID	d ₀ mm	E GPa	R _{p0.2} MPa	F _m N	R _m MPa	R _B MPa	A _g %	A %	Z %
	1	8,053	197	1220	64914	1274	1269	0,5	0,5	0,8
	2	8,077	172	-	59021	1152	1131	0,1	0,1	0,4
	3	8,055	172	1200	61774	1212	1191	0,3	0,3	0,9
	Kaleno -1	8,083	179	1264	67154	1309	1296	0,5	0,7	1,1
	Kaleno -2	8,075	173	1149	60851	1188	1132	0,1	0,2	0,5
	Kaleno -3	8,073	170	1255	65876	1287	1238	0,3	0,5	0,6

Na obrázku 24 je ďalej zobrazená grafická reprezentácia priebehov ťahových skúšok pre jednotlivé testované telieska z materiálu Maraging 200.



Obr. 24: Grafický priebeh ťahových skúšok pre Maraging 200

Výsledky získane z realizovaných ťahových skúšok do istej miery neodpovedajú predpokladom. Materiál Maraging 200 by mal pri tomto tepelnom spracovaní dosahovať hodnoty ťažnosti približne 10 až 11%. Pri teste odliatkov ktoré neboli podrobené tepelnému spracovaniu bola priemerná hodnota ťažnosti 0.3%. v prípade vzoriek podrobených tepelnému spracovaniu na 1000 °C odpovedala priemerná nameraná ťažnosť hodnote 0.5%. obe tieto hodnoty ležia pod očakávanými výsledkami. [31] [32]

Taktiež priemerná hodnota medze pevnosti R_m tepelne nespracovaných vzorkov predstavuje 1212.6 Mpa. Hodnota medze pevnosti R_m pre tepelne spracované vzorky vychádza na 1261,3Mpa. V porovnaní s predpokladanými hodnotami približne určenými na 1500 Mpa sa aj v tomto meraní odlievajú vzorky odchyľujú od požadovaných vlastností. [31] [32]

Napriek výsledkom ktoré neodpovedajú predpokladom je možné stanoviť trend vo vplyve tepelného spracovania na materiál Maraging 200. Podľa výsledkov ťahových skúšok je zrejmé, že pri tepelnom spracovaní hodnota medze pevnosti R_m ako aj ťažnosti rástla. Celkovo priaznivý vplyv tepelného spracovania avšak nepôsobí príliš markantný rozdiel medzi hodnotami porovnávaných vzoriek bez tepelného spracovania. Tento fakt ukazuje na možnosť spracovávanie tenkostenných odliatkov výhradne procesom starnutia materiálu, pričom by výsledné mechanické vlastnosti boli mierne zhoršené oproti kaleným odliatkom. Tento faktor je kľúčový pre výrobu košov šablí procesom, ktorý neohrozí kvalitu povrchu a zároveň dodá materiálu dostatočné mechanické vlastnosti.

Podrobnejší rozbor možných príčin výsledkov ťahových skúšok materiálu Maraging 200, ktoré nezodpovedajú predpokladom, bude v závere práce.

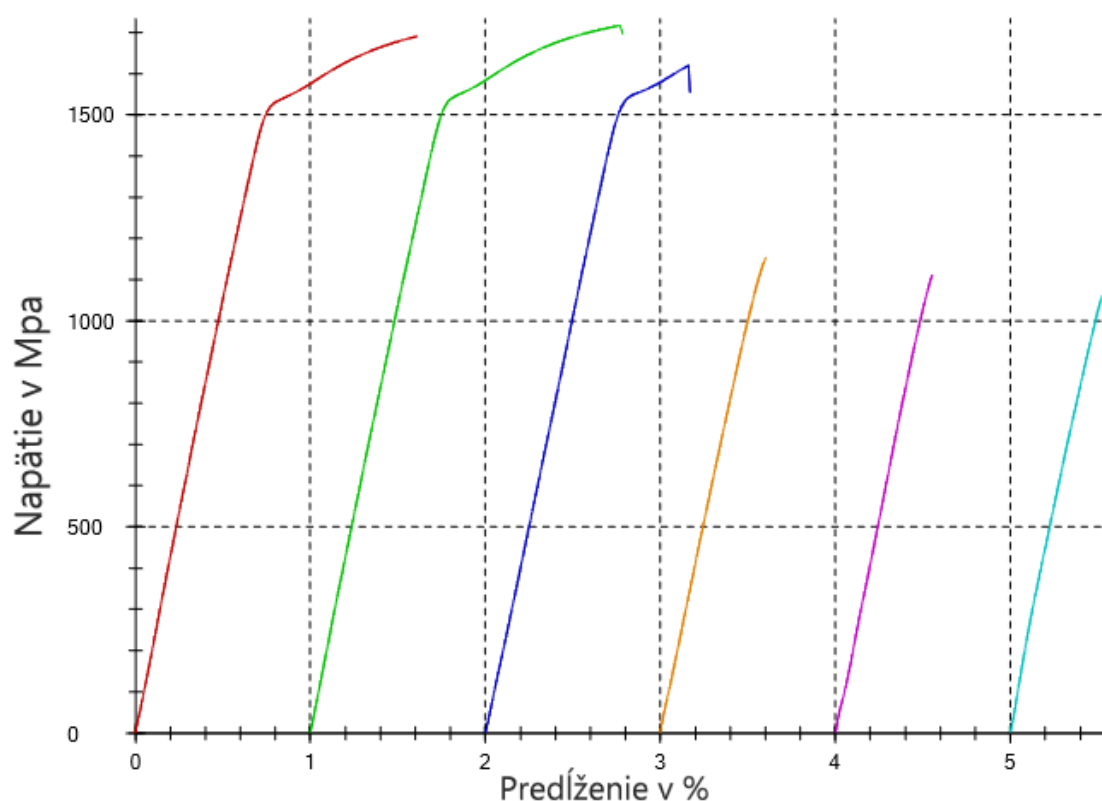
Materiál Maraging 200 je testovaný ako vývojový stupeň odlievajú materiálu 42CrMo4 ktorý je do istej miery implementovaný do výrobného procesu. Pre objektívne vyhodnotenie oboch materiálov a zrovnanie základných materiálových charakteristík, ovplyvňujúcich kvalitu výrobkov, boli aj z ocele 42CrMo4 zhotovené skúšobné telieska pre ťahovú skúšku.

Telieska boli dodané firmou SIGI forge s.r.o. ako dve sady. Prvá testovacia sada pozostávala z troch testovacích tyčiek kalených a popustených na 52 HRC. Druhá testovacia sada obsahovala opäť sériu troch tyčiek tentokrát kalených a popustených na 48 HRC. Tieto hodnoty boli zvolené ako východzie záchytné body pri testovaní. Dielce bežne vyrábané ako priečky mečov sú spracovávané na 52 HRC aby dokázali odolať nárazom čepelí pri používaní výrobku v praxi. Táto hodnota avšak nebola nikdy overovaná pre odlievaný materiál 42CrMo4 a preto bol tento bod výskumu taktiež zaradený do práce. Dodané vzorky boli podrobené ťahovej skúške. Výsledky sú zobrazené v tabuľke 6.

Tabuľka 6: Mechanické vlastnosti materiálu 42CrMo4

Legenda	Specimen ID	d ₀ mm	L ₀ mm	E GPa	R _{p0.2} MPa	F _m N	R _m MPa	R _B MPa	A _g %	A %	Z %
	HRC 48-1	8,08	40,00	214	1558	86652	1690	1690	0,8	0,8	0,7
	HRC 48-2	8,06	40,00	208	1571	87576	1716	1697	0,9	1,0	1,5
	HRC 48-3	8,06	40,00	203	1574	82628	1619	1555	0,4	0,4	1,0
	HRC 52-1	8,06	40,00	203	-	58875	1154	1154	0,0	0,0	0,0
	HRC 52-2	8,09	40,00	213	-	57105	1111	1111	0,0	0,0	0,0
	HRC 52-3	8,04	40,00	202	-	53833	1060	1060	0,0	0,0	0,0

Na obrázku 25 je možné pozorovať grafickú reprezentáciu prebehnutých testov na materiály 42CrMo4.



Obr. 25: Grafický priebeh ťahových skúšok pre 42CrMo4

Z týchto údajov jasne vyplýva zásadný problém pri používaní materiálu 42CrMo4 ktorý je tepelne spracovaný na 52 HRC. Vzorky podrobené ťahovej skúške pri tejto tvrdosti nevykazujú žiadne plastické chovanie a pri všetkých troch pokusoch došlo k predčasnému krehkému lomu bez viditeľnej medze klzu $R_{p0.2}$. Napriek dosiahnutej medze pevnosti R_m v priemere

1108,33 Mpa je používanie takýchto priečok nevhodné. Pri akejkoľvek vade zlievarenského procesu ktorá by nebola odhalená na odliatkoch pri obrábaní a skladaní meča, by mohlo dôjsť ku poškodeniu v prevádzke čo by mohlo mať za následok zlomenie priečky. Takéto poruchy sú v praxi nepripustné. Pri pohľade na výsledky získané zo série vzorkov spracovaných na 48 HRC je možné pozorovať plastický priebeh deformácie pri skúške. Ťažnosť týchto testovacích vzorkov bola v priemere 0,73%. Tento výsledok je v mnohých smeroch dostačujúci, nakoľko pri deformácii vznikla priemerná medza klzu $R_{p0.2}$ rovná 1567,6 Mpa. Dosiahnutá bola taktiež priemerná medza pevnosti R_m : 1675 Mpa. Tento nárast predstavuje priemerné zvýšenie medze pevnosti pri vzorkách upravených na 48 HRC oproti 52 HRC o 41,4%.

Na základe týchto zistení bolo odporúčené firme SIGI forge s.r.o. zrušiť metódu spracovávania materiálov priečok v prípade 42CrMo4 na tvrdosť 52 HRC. Tento proces neprináša pre funkčnosť dielcu v porovnaní s vlastnosťami dielov spracovaných na 48 HRC žiadne benefity. Po konzultácii výsledkov boli priečky spracovávané na 52 HRC stiahnuté z výrobného procesu pre dodatkové tepelné spracovanie. Pre ďalšie priečky bude firma SIGI forge s.r.o. používať priečky tepelne spracovávané na hodnoty 46 až 48 HRC.

6 ZHOTOVENIE KERAMICKEJ ŠKRUPINY

Výroba samotných odliatkov bude prebiehať pomocou metódy presného odlievania ako už bolo uvádzané vyššie. Tento proces je jeden z najstarších zlievarenských procesov v histórii. Mnohé firmy ponúkajú v dnešnej dobe svoje služby pre produkciu odliatkov sériového charakteru.

Proces presného odlievania pozostáva z vyhotovenia modelov. Tie sú najčastejšie vyrábané z modelárskych voskov za pomoci foriem na voskový vstrekolis. Pre naše účely nie sú tieto formy vhodné, obzvlášť prihliadnuc na ich značnú cenu. Preto budeme pri testovaní a produkcii experimentálnych sérií využívať metódy 3D tlače. To nám umožňuje veľkú flexibilitu a možnosť reakcie zmenami modelov priamo podľa spätnej väzby z experimentu. [7]

Po pripravení série produktov ktoré majú byť odliate, sú následne všetky modely upevnené na voskový vtokový kôl: „stromček“. Voskové stromčeky ďalej prechádzajú spracovaním pri ktorom sú máčané v keramickej kvapaline, takzvanej „brečke“ a následne zasypávané žiaruvzdorným pieskom. Medzi každým týmto dvoj krokom sú vznikajúce škrupiny vysušané.

Pri obalovaní sa dbá na presnosť prvých vrstiev a precízne pokrytie povrchu stromčeka brečkou spolu s úplným zásypom žiaruvzdorným materiálom. Prvé obaly sú aj naďalej v mnohých fabrikách aplikované ručne, skúseným pracovníkom pre ich bezchybné prevedenie. Pri aplikácii hrubých obalových vrstiev škrupiny sa v modernejších pracoviskách užívajú robotické manipulátory. Každý z týchto krokov je rozdelený časom potrebným pre úplné preschnutie škrupiny pred ďalším bodom procesu ktorý v bežnej praxi trvá 1 pracovný deň, z toho vyplýva že príprava škrupiny zaberie podľa obťažnosti geometrie asi 7 dní. [2] [5]

Po dokončení obalovacieho procesu je vosk vytavený zo škrupiny pomocou tepelného šoku zabezpečeného najčastejšie zariadením ako je boilerkláve či upravená žihacia pec s dopaľovaním splodín pre hygienicky nezávadný priebeh operácie. Po ukončení vytavovania je forma vyžíhaná v teplotnom rozhraní 900 až 1000°C. Po týchto úkonoch je škrupina pripravená na odlievanie. [2] [5]

6.1 CYCLONE

Ako je možné pozorovať, príprava keramických škrupín je komplexný a časovo náročný proces zahrňujúci množstvo krokov ktoré je nutné vykonať bez chyby pre zhotovenie zdravej škrupiny. Pre potreby experimentu na ktorom je založená táto práca bol zvolený výrobný postup za použitia stroja na výrobu prototypov: CYCLONE. Pre ilustráciu komplexnosti zariadenia je priložený obrázok 26. [34] [35]

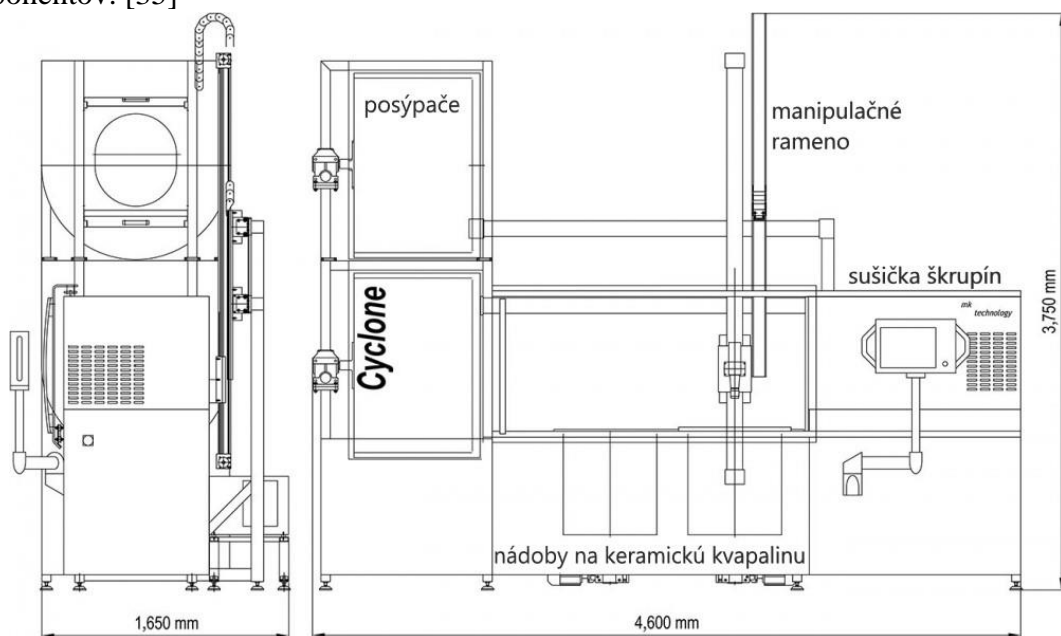


Obr. 26: Stroj Cyclone [34]

Tento stroj umožňuje proces ktorý je takmer nezlučiteľný s klasickým postupom pri výrobe odliatkov metódou investment casting, ide o proces rapidného zhotovovania prototypov alebo tiež „rapid prototyping“. Ako bolo už spomínané, bežná výrobná doba škrupiny s dnes už štandardným spojivom na báze vody je niekoľko pracovných dní pričom celý proces môže zaberať aj rádovo mesiace, kým zákazník vidí prvé produkty na ktorých je možné testovať vlastnosti a doladovať prípadné nedostatky. [35]

Tam kde tieto metódy neposkytujú možnosť pilotných testov či malých, skúšobných sérií, prichádza CYCLONE, vďaka svojej technológii je tento stroj schopný zhotovovať škrupiny za 7 hodín. Tento čas pokrýva všetky operácie od bodu vloženia voskového

stromčeka do robotického upínača až po vyňatie hotovej škrupiny pripravenej na vytavenie vosku. Základné operácie sú realizované robotickým ramenom ktoré namáča stromček do keramickej kvapaliny a následne obsypáva namočený stromček v posýpacom bubne. K dispozícii sú 2 nádrže na keramickú kvapalinu pre redšiu primárnu zmes a hustejšiu zmes určenú na obalové vrstvy škrupiny. K tomu účelu je na stroji umiestnený odpovedajúci pár rotačných posýpacích bubnov pre primárny a radu sekundárnych obalov. Na obrázku 27 je CYCLONE znázornený schematicky s popisom a vizualizáciou presného uloženia jednotlivých komponentov. [35]



Obr. 27: Schéma stroja Cyclone [35]

Najprielomovejšie časť zariadenia sa však nachádza na jeho pravej strane. Jedná sa o sušičku na škrupinové obaly, ktorá umožňuje tomuto stroju jeho prelomovo rýchle zhotovovanie škrupín. Sušenie škrupín predstavuje až 95% času celého procesu výroby. Úloha ktorú plní je

zdanlivo jednoduchá: voda ktorá je obsiahnutá v pojive musí byť odstránená čo možno najšetnejšie a zároveň rýchlo. Taktiež treba dbať na vosk ktorý funguje ako model, akékoľvek poškodenie či deformácia ohrevom by znehodnotili výslednú škrupinu. [35]

Prvým experimentom bolo použitie vákuovej technológie pre odstránenie vody z obalu. Navzdory prekvapivo dobrým výsledkom pri rýchlom vyparení vody, sa v obale nevytvorili žiadne spoje a vrstva sa rozpadla pri ďalšom pokuse o nadväzné obaly. Použitie iných pojív je taktiež bezpredmetné nakoľko by toto rozhodnutie vyžadovalo komplexný a dlho trvajúci výskum pre doladenie tejto technológie, nehovoriac o logistických komplikáciách pre firmy.

Prelom nastal vo využití experimentálnej sušiackej technológie ktorá kombinuje viaceré metódy sušenia pre vytvorenie komplexných, priaznivých podmienok pôsobiach na vysušanie obal. Boli zavedené nasledovné postupy: v sušičke je vytvorený kontinuálny extrémne turbulentný tok vzduchu za pomoci rady výkonných vetrákov. Stromček na otáča aby bol tok vzduchu rovnomerný po celom povrch, podobne ako pečené mäso. Tento proces má za následok deviáciu teploty škrupiny približne o 10°C. Tento efekt bolo nutné kompenzovať. Riešenie sa ukázalo ako jednoduché a finančne nenáročné, ku vetrákom boli nainštalované stredo-vlnové infračervené žiarovky redukujúce fluktuáciu teploty a udržiavajúce škrupiny na 25-30°. [35]

Nakoľko sú obalové vrstvy veľmi náchylné na zmeny teploty, vzduch vháňaný do priestoru sušičky je tepelne upravovaný. Ako posledná úprava procesu sušenia je zníženie vlhkosti na hodnotu 10 až 15%. Všetky tieto procesy sú dôkladne kontrolované v priebehu sušenia pomocou komplexného poľa senzorov. [35]

Výsledkom tohto procesu je významná zmena v rýchlosti výroby škrupín. Tam kde v konvenčných podmienkach potrebuje obal 24 hodín pre kompletné vyschnutie, potrebuje CYCLONE približne 30 minút. Pri takto veľkom zvýšení rýchlosti výroby je zvykom očakávať zhoršenie kvality v iných oblastiach ako je kvalita výslednej škrupiny či dokonca samotná pevnosť. Opak je však pravdou, nakoľko sa pri testoch ukázali spoje vytvorené sušiacou technológiou stroja CYCLONE ako lepšie než spoje vytvárané pozvoľným sušením po dlhú dobu čo má za následok paradoxne pevnejšie škrupiny s lepšími vlastnosťami. [34] [35]

Nakoľko sú škrupiny pevnejšie, vo výsledku je potrebných menej obalových vrstiev pre rovnakú stálosť a tvrdosť, to má priaznivý vplyv hlavne na priedušnosť ktorá je veľmi podstatná pre výrobu zdravých odliatkov. [35]

Vďaka využitiu stroja CYCLONE bolo možné realizovať naše experimentálne série odliatkov. Výroba prototypov v procese presného odlievania je prelomová a v dnešnej dobe ešte stále málo rozšírená, preto považujeme možnosť práce s týmto výnimočným strojom za kľúčovú pre realizáciu experimentu a vývoja technológie pre sériové využitie. Jedným z mála nedostatkov pri zhotovovaní škrupín týmto spôsobom je finančná náročnosť jednej formy v porovnaní s klasickou, veľkosériovou výrobou. Dôkladné zhodnotenie a odraz na cene finálneho produktu budú bližšie rozpracované vo finančnom vyhodnotení projektu.

7 PRVÉ ODLIEVANIE OCELE MARAGING 200

Po finalizácii teoretických predpokladov v oblasti vtokovania odliatkov pri numerických simuláciách sa pristúpilo ku započatiu praktickej časti práce. Pri príprave boli praktikované všetky nadobudnuté informácie a poznatky pojednávajúce o predpokladanom priebehu odlievania z materiálu Maraging 200. Taktiež boli implementované zmeny v materiály pre 3D tlač na filament PolyCastTM pre všetky nasledujúce pokusy ktoré užívali modely vytvorené pomocou technológie 3D tlače.

Pre prvé odlievania bola zvolená tavba materiálu o hmotnosti 80 kg. Táto hmotnosť bola stanovená pre maximálne využitie objemu pece a optimálny priebeh tavby.

7.1 Modely

Pre prvú tavbu boli optimalizované tri základne geometrie určené ako testovacie vzorky pre výrobu z materiálu Maraging 200.

Prvou geometriou bola klasická osem uholníková priečka. Tento model bol dodaný firmou SIGI forge s.r.o. vo voskovom prevedení. Voskové modely osemuholníkovej priečky sa v dnešnej dobe bežne zhotovujú nakoľko sa jedná o základ sériovej produkcie ako už bolo uvádzané. Priečky sú taktiež vybavené vtokovou sústavou ktorá pozostáva z dvoch lichobežníkových kvádrov napojených na hornú časť priečky meča. Tento systém sa ukázal ako veľmi efektívny pri výrobe sériových kusov, preto nebol predpoklad nutnosti zmeny vtokovania samotných odliatkov. Model taktiež disponuje pomerne tenkými časťami. Tieto kritické body sú takzvané podperky priečky ktoré fungujú ako spojovací prvok medzi telom meča a samotnou priečkou. Obe tieto podperky disponujú pomerne kritickými bodmi pre zabehnutie kovu a preto sa im venovala zvýšená pozornosť pri návrhu ukotvenia modelov na vtokový kôl a ich dodatočnému vybaveniu výfukovým vedením pre zlepšenie odvodu plynov z dutiny formy. Všetky tieto prvky je možné pozorovať na obrázku 28.

Jeden zo základných problémov bolo určenie rýchlosti topenia voskových modelov, nakoľko sa jednalo o vosk dodaný treťou stranou s ktorým do tej doby naša prevádzka nepracovala. Po uskutočnení série porovnávacích testov s ostatnými voskami bol pre vtokovú sústavu, určenú na odlievanie osem uholníkových priečok zvolený rýchlo topiaci vosk z firmy Moravia tech a.s.. Rýchlosť topenia vosku je veľmi dôležitý faktor ktorý zásadne ovplyvňuje proces vytavovania vosku z objemu keramickej škrupiny. Tento proces by zákonite vyústil v prasknutie obalu, ak by sa primárne rozpúšťal modelový vosk. Tento jav by mal za následok tlak v dutine formy spôsobený rozpínaním modelového vosku ktorému nebolo možné opustiť formu, nakoľko vosk vtoku by ešte nebol roztavený.

Prvá vtoková zostava bola zvolená ako test zabiehavosti práve pre dané osem uholníkové priečky. Pre tento konkrétny experiment bol zvolený krátky voskový kôl merajúci 20 cm po



Obr. 28: Vtoková zostava s dvoma osem uholníkovými priečkami

dĺžke. Samotné voskové modely boli napojené na stred odlievacieho kolu ako je možné vidieť na obrázku 28. Tento fakt zabezpečoval minimálny metalo statický tlak pôsobiaci na kov plniaci dutiny modelov. Tento princíp mal za účel zistenie limitov zabiehavosti použitého materiálu Maraging 200. Ako je možné všimnúť si na obrázku 28, jeden z modelov bol dodatočne vybavený výfukmi v oblastiach koncov priečky, ako aj spojeným výfukom pre odvod plynov z podperkových častí priečky. Druhý model bol pre tento test ponechaný úplne bez odvzdušnenia aby bolo možné porovnať vplyv tohto opatrenia na priebeh odlievania a spôsob tuhnutia odliatku v keramickej škrupine. Oba modely boli taktiež naklonené približne o 22 stupňov smerom nadol, v rámci spôsobu plnenia formy. Toto patrenie malo mať za následok zlepšenie zabehnutia kovu do problematických miest na odliatku.

Ako druhá zostava pre odlievanie bola zvolená skupina šiestich modelov. Pre tento vtokový kôl boli taktiež zvolené osem uholníkové priečky mečov. Tentokrát sa však kládol dôraz na výrobu viacerých kusov pre možnosť testovania tepelného spracovania a prevedenia testov vo forme SIGI forge s.r.o.. Pre tento modelový stromček bol zvolený vtokový kôl klasických rozmerov o dĺžke 40 cm. Celkovo šesť modelov priečok bolo lokalizovaných rovnomerne po dvoch oproti sebe smerujúcich stenách kolu ako je možné pozorovať na obrázku 29. Materiál použitý na výrobu dlhého odlievacieho kolu bol zase rýchlo taviaci vosk z firmy Moravia tech a.s.. Ako je možné pozorovať na obrázku 29, modely boli aj v tomto prípade sklopené približne o 20 stupňov vzhľadom na spôsob plnenia formy. Všetkých šesť priečok bolo taktiež vybavených trojicou odvzdušňovacích výfukov. Tie zabezpečovali odvod plynov z koncov priečok ako aj z kritických bodov v miestach podperiek presne tak ako tomu bolo u predchádzajúceho modelu. Modelový stromček bol napokon vybavený aj voskovými telieskami valcovitého tvaru. Tieto priliate telieska slúžia na zhotovovanie vzorkov na ťahovú skúšku pre odlievaný materiál. Pre ďalší postup experimentu bola zhotovená séria troch týchto priliatych teliesok.



Obr. 29: Vtoková zostava šiestich priečok

Ďalšími modelmi ktoré boli testované pri prvom odlievaní materiálu Maraging 200 boli už spomínané tenkostenné koše pre výrobu šablí. Tieto odliatky predstavovali zásadný bod v experimente vzhľadom na svoje unikátne vlastnosti a dimenzie dutiny formy. Na základe poznatkov z numerickej simulácie boli zvolené dva prístupy riešenia vtokovania týchto problematických modelov.

Prvý spôsob napojenia modelu na vtokovú sústavu pozostával z priameho umiestnenia odliatku pod odlievacím kolom. Tento druh, ktorý bol referovaný ako napojenie 1, bol zvolený ako najpriaznivejší s ohľadom na metalo statický tlak pôsobiaci na model, preto mal podľa výsledkov simulácie najlepšie predpoklady na úplné zabehnutie a vytvorenie zdravého odliatku bez zachytených plynov. Model bol taktiež opatrený výfukmi v kritických bodoch lokalizovaných numericou simuláciou pre čo najlepšie odvzdušnenie pri odlievaní. Vtokový kôl bol zhotovený z vosku RUNNERPLUS.

V tomto konkrétnom prípade bola zvolená jemná variácia riešenia, kde sme kôš spojili s vtokovým kolom v koncovom bode odliatku ako je možné vidieť na obrázku 30. Toto opatrenie malo zabezpečiť prechod z výlučne spodného plnenia modelu na horné cez druhý vtokový bod vytvorený koncovým, úzkym profilom. Toto opatrenie bolo implementované zo strachu nedobehnutia kovu pri stúpaní do zúženého profilu. Vzhľadom na túto skutočnosť bol tretí výfuk relokalizovaný na stred zúženého profilu kde mal slúžiť ako vývod vzduchu pre odvedenie plynov ktoré by mohli zostať zachytené medzi dvoma frontami postupujúceho kovu pri plnení dutiny. Všetky tieto zmeny sú jasne viditeľné na obrázku 30.



Obr. 30: Vizualizácia vtokovania tenkostenného modelu koša šable

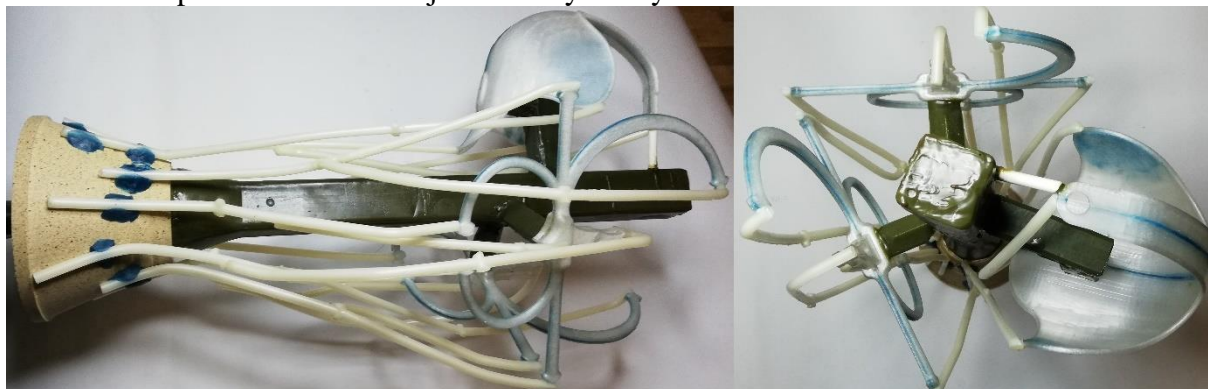
Za povšimnutie taktiež stojí materiál modelu. Ten bol dodaný firmou SIGI forge s.r.o. a jedná sa o klasický PLA materiál. Model bol zhotovovaný rovnakým spôsobom ako výťahy z materiálu PolyCastTM, čo znamená tlač z dvoch kusov ktoré boli následne zlepené

a domodelované pomocou vosku. Tento materiál je menej vhodný pre proces presného odlievania a pri zhotovovaní ďalších modeloch už nebol použitý.

Posledný modelový stromček pozostával z tenkostenného koša napojeného na vtok hybridným spôsobom, doplneného o dva odliatky tvarových šablí. V tomto prípade bola zvolená varianta vtokovania tenkostenného modelu za použitia spôsobu pripojenia na vtokový kôl na jednu z jeho bočných strán, avšak samotné vyústenie do modelu bolo ponechané podľa predchádzajúceho spôsobu.

Pri prevedení tohto napojenia bola zhotovená vtoková sústava zaústená iba do jedného bodu tak ako to bolo v numerickej simulácii, pričom bol kôš vybavený opäť troma výfukmi, tentokrát avšak na miestach ktoré presne stanovila simulácia. Kôš bol v koncovom bode zúženého profilu fixovaný ku voskovému vtokovému kolu pomocou keramickej trubičky ktorá plnila iba funkciu stabilizátora pri obaľovaní. Tieto prvky sú znázornené na obrázku 31.

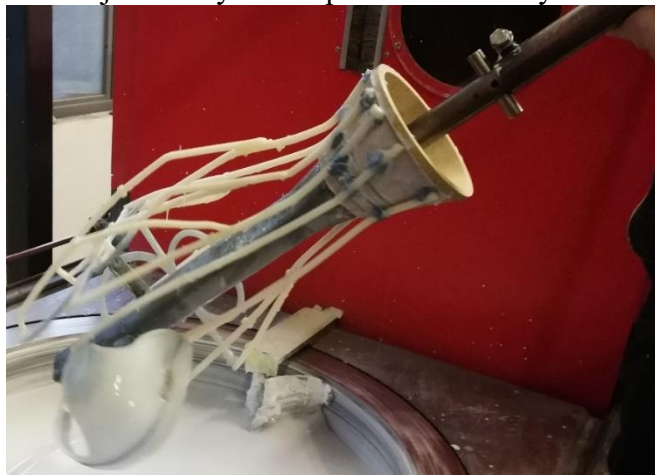
Ku tomuto vtokovému systému boli zaradené taktiež dva kusy profilových priečok s veľkou tvarovou rôznorodosťou. Boli zaradené do experimentu ako pokus pre dobehnutie do takto tvarovaných modelov. Tento bol vyžiadaný firmou SIGI forge s.r.o. pre porovnanie zabiehavosti kovu do tenkostenných škrupín akými sú spomínané koše a tvarovo náročnými dielmi ktoré ale nedisponujú tenkostennou geometriou. Ako je možné pozorovať na obrázku 31, modely sú vybavené siedmimi výfukmi aby sa maximalizovala pravdepodobnosť zabehnutia v plnom rozsahu a objeme dutiny formy.



Obr. 31: Kombinovaná vtoková sústava

7.2 Výroba keramických škrupín

Pre realizáciu výroby keramických škrupín bol použitý obalovací stroj CYCLONE. Všetky škrupiny boli zhotovované rovnakým spôsobom pri dodržaní všetkých výrobných kritérií. Počet obalov jednotlivých škrupín bol stanovený na 9. Toto číslo zahŕňa taktiež primárny obal ktorý



Obr. 32: Ručná aplikácia prvej vrstvy škrupiny

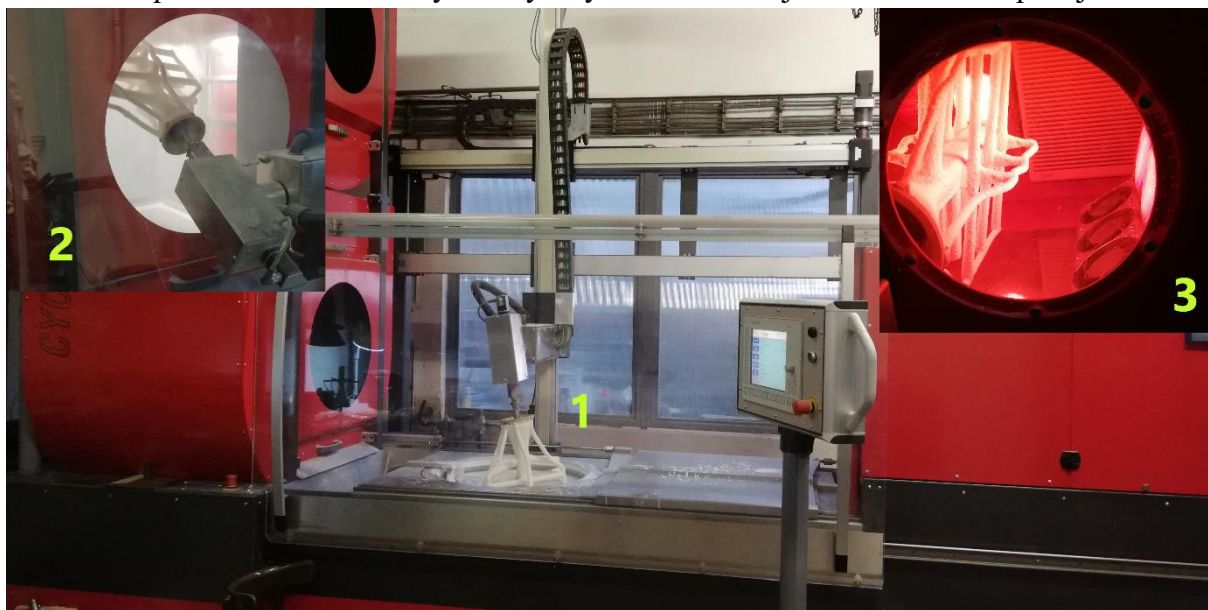
bol aplikovaný na voskové modely ručným spôsobom pre zaistenie bezchybnosti primárnej vrstvy a tým aj kvalitu finálneho produktu odlievania.

Aplikácia prvej vrstvy je v mnohých prípadoch kľúčová nielen z dôvodu správneho kopírovania povrchu ale taktiež samotného obalenia modelu keramicou kvapalinou a následným rovnomerným zásypom ktorý zabezpečí správne obalenie každej plochy modelu. Na obrázky 32 môžeme pozorovať ručné máčanie štvrtej zostavy modelov v keramickej kvapaline. Tento konkrétny

modelový stromček bolo nutné obaľovať obzvlášť dôkladne prihliadnúc na jeho komplikovanosť a náročnosť geometrií jednotlivých modelov.

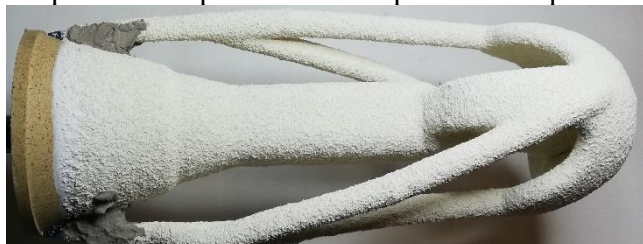
Pri obaľovaní modelov prvou vrstvou sa používa keramická kvapalina primcote prímесou Ranco-sil TM 200 mesh, ktorá je redšia oproti kvapaline užíwanej pri ďalších, spevňujúcich vrstvách. Taktiež posyp je omnoho jemnejší pre vytvorenie vernej kópie povrchu voskových modelov. V tomto kroku bol použitý posyp zirkónovým pieskom o zrnitosti 50/80. Tento proces avšak značne zhoršuje pórovitosť formy preto nie je možné efektívne obaľovať viacero primárnych vrstiev. To by malo za následok zvýšené riziko nevypálenia vosky, prasknutia pri vypaľovaní či dokonca problémy so zbiehavosťou pri odlievaní.

Všetky ostatné vrstvy posypu sú automatizované a vykonáva ich priamo CYCLONE. Pre priebeh ôsmich zostávajúcich obalov boli zakaždým usporiadané uhly náklonu ramena v rotačných tankoch na aplikáciu keramickej kvapaliny ako aj pri manipulácii so stromčekom v zirkónovom posýpači. Čas sušenia bol zvolený ako prednastavený programový čas odporúčaný výrobcom: 20 minút. Na obrázku 33 môžeme pozorovať manipuláciu stroja CYCLONE s voskovým stromčekom počas jednotlivých fáz výrobného procesu keramickej škrupiny. V bode 1 je znázornené robotické rameno ktoré ponára voskový stromček pod uhlom do keramickej kvapaliny Primcote s prímесou Ranco-sil TM 200mesh s hustotouXX. Bod 2 ukazuje pozíciu ramena v jednom z posýpacích bubnov stroja kde sa na model nanáša vrstva keramickej drte Molochite 1630 DD. V poslednom bode 3, je stromček znázornený v sušičke kde sa suší po stanovenú dobu. Cyklus výroby sa za neustálej rotácie modelu opakuje.



Obr. 33: Výrobný postup stroja CYCLONE

Po dokončení všetkých obalov bola na škrupine obsahujúcej model koša lokalizovaná možná vada, pri obaľovaní sa vrstva škrupiny ktorá sa nabaľovala na keramickom vtoku nespojila s vrstvami obaľujúcimi výfuky. Tento problém bol riešený aplikáciou žiaruvzdorného tmelu na oslabené miesta, ako výstužový materiál. Tento tmel sa pri žíhaní škrupín vytvrdí a zabezpečí bezpečnú manipuláciu so škrupinou. Celá problematika je znázornená na obrázku 34.



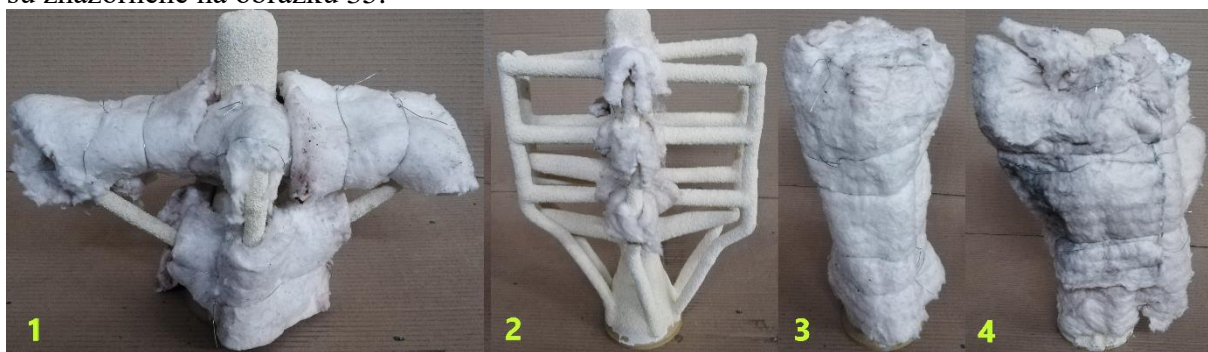
Obr. 34: Oprava škrupiny koša šable

Nadväzujúcim krokom pri dokončovaní keramických škrupín bolo vytavovanie voskových a plastových modelov z dutín foriem. Tento proces bol prevedený v žíhacej peci s funkciou dopaľovania splodín. Táto pec je schopná vytvoriť nárazový tepelný šok pôsobiaci na formy

položené vo vnútri. Ten je základným predpokladom úspechu vytavovania vosku a vypálenia modelov z materiálu PolyCastTM ako aj PLA. Vosk sa nataví od povrchu pôsobením značného tepla, tým sa skvapalní povrchová vrstva ktorá následne umožní rozpínanie objemu vosku ktorý sa začne topiť následne. Počas procesu vytavovania sa tekutý vosk presúva zvom do pripraveného zachytneho zásobníku naplneného vodou ktorý funguje ako chladiaci rezervoár. Pri vytavovaní vosku z keramických škrupín nevznikli žiadne škody na škrupinách a tie boli následne pripravené na ďalšiu operáciu.

Ďalším krokom výroby bolo prepláchnutie vyrobených škrupín vodou. Pri tomto kroku sa do škrupiny zavedie prúd vody, ten má za účel odstrániť zvyšky plastov či popola ktorý na stenách formy ulpel pri vytavovaní. Tento krok je zásadný pre zaistenie čistoty dutiny formy a tým aj kvalitu odlievanych dielov s minimalizovaním rizika na výrobu chybných kusov. Taktiež tento proces funguje ako indikácia tesnosti formy, ak by sa v tomto bode našli priesaky kvapaliny, znamená to že forma má v sebe malé praskliny, tie by sa museli pred odlievaním zatmeliť vysokoteplotným tmelom aby sa zaistila funkčnosť formy pri samotnom procese odlievania.

Formy sú po vysušení ešte preplachované vzduchom, tento proces poistuje čistotu formy. Ak škrupina splňuje všetky požiadavky a neboli na nej lokalizované žiadne defekty, je na jej povrch podľa potreby aplikovaný DURABLANKET od firmy UNIFRAX. Tento tepelno-izolačný materiál slúži ako izolácia kryjúca zvolené miesta na forme ktoré by mali tuhnúť ako posledné. Jedná sa o prostriedok zlepšenie usmernenia tuhnutia v odliatkoch vyrábaných technológiou presného odlievania. Jednotlivé škrupiny obalené materiálom DURABLANKET sú znázornené na obrázku 35.



Obr. 35: Keramické škrupiny obalené materiálom DURABLANKET

Ako je možné si všimnúť, na škrupine 1 boli zaizolované celé priečky pre spomalenie procesu tuhnutia, taktiež bol zaizolovaný aj vtok pre zabránenie stuhnutia vtoku skôr ako odliatkov, čo by malo za následok stiahnutiny v objeme odliatku. Pri škrupine 2 boli zaizolované iba zaústenia vtokov pre zlepšenie dosadzovania kovu počas tuhnutia. Škrupiny 3 a 4 boli zaizolované plošne pre celkové spomalenie tuhnutia a tým zlepšenie zabiehavosti kovu v tenkostenných odliatkoch umiestnených v týchto škrupinách.

7.3 Odlievanie

Bezprostredne pred procesom odlievania boli škrupiny žíhané na teplotu 1000°C. Týmto sa dosahuje zhutnenie štruktúry keramických škrupín a zaistenie pevnosti nutnej pri samotnom odlievaní. Jednotlivé škrupiny boli umiestnené do žíhacej pece a ohrievané na teplotu 1028°C. Aby sa zaistili čo možno najlepšie podmienky pre odlievanie tenkostenných modelov, boli formy ktoré obsahovali kôš na šablú umiestnené v menších, o niečo výkonnejších peciach. Tieto škrupiny sa ohrievali na teplotu až 1100°C.

Týmto spôsobom sme schopní predhriať škrupiny, čím znížime tepelný šok roztaveného kovu ktorý ležeme do chladnejšieho prostredia. Takýmto spracovaním zlepšime vzdialenosť do ktorej daný kov dokáže zabehnúť aj pri veľmi tenkostenných profiloch. Taktiež je pri vysokej

teplote škrupiny v dutine riedka atmosféra, čo pozitívne vplýva na zníženie reoxidácie taveniny, zamedzenie prepaľovaniu prvkov ako je titán ale taktiež tým znižujeme množstvo plynov v dutine ktoré je treba odstrániť pri odlievaní. Jednotlivé škrupiny žihané na teploty pred odlievaním sú znázornené na obrázku 36.



Obr. 36: Obalené keramické škrupiny v žihacích peciach

Proces samotného odlievania započal natavením vstupných surovín v indukčnej peci. Vzhľadom na problematiku výroby materiálu Maraging 200 je počas celej doby tavby pec vákuovaná. Chemické zloženie ako aj teplota boli overené dvakrát počas tavby. Pri samotnom procese

odlievania je kov preliaty do odlievacej panvice z ktorej je odobraná posledná vzorka. Následne sa skontroluje teplota. Medzi tým prináša pracovník prvú škrupinu vytiahnutú z pece, tá ja následne odliata, v krátkom slede sú na odlievacie pole dopravené aj ostatné škrupiny, každá umiestnená v ochrannom ráme ktorý ju drží v vzpriamenej polohe pre umožnenie odlievania. Ihneď po dopravení škrupín je do každej naliaty dostatočný objem kovu a vtok je zasypaný exotermickým zásypom udržiavajúcim vtok každej škrupiny tekutý, čím sa zaisťuje správne dosadzovanie kovu do modelov. Celý proces odlitia zabral približne 3 minúty od započatia donášania prvej škrupiny. Rýchlosť procesu plnenia a odlievania bola hodnotená na výbornú. Výsledné naplnené formy je možné pozorovať na obrázku 37.



Obr. 37: Odliate škrupiny prvého tavenia materiálu Maraging 200

7.4 Zhodnotenie výsledkov

Napriek tomu, že počas výroby škrupín nevznikli žiadne pochybenia a rýchlosť odlitia bola viac než dostatočujúca, experimentálne odlitie prvej várky modelov z materiálu Maraging 200 neodpovedalo požadovaným štandardom.

Prvá komplikácia sa objavila pri výsledkoch dodaných z laboratória po uskutočnení rozboru odlievaného kovu zo vzorky odobranej z odlievacej panvice. Zloženie kovu ktorý bol odliaty v prvej tavbe sa ukázalo ako nesprávne. V tabuľke 7 je znázornená odchýlka reálnych hodnôt zloženia od požadovaných.

Tabuľka 7: Zrovnanie chemického zloženia materiálu Maraging 200

Požadované hodnoty chemického zloženia ocele Maraging 200									
C (%)	Al (%)	Ti (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Co (%)	Ni (%)	Mo (%)	B (%)
Max	Min	Min	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max
0,03	0,10	0,20	0,10	0,03	0,01	8,50	18,0	3,0	0,003
Chemické zloženie ocele Maraging 200 pri prvom odlievaní									
C (%)	Al (%)	Ti (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Co (%)	Ni (%)	Mo (%)	B (%)
0,009	0,014	0,061	0,158	0,011	0,004	8,75	17,74	3,619	0,001

Ako je možné pozorovať, v priebehu procesu tavby nastal problém ktorý zapríčinil rapidné prepálenie hliníku a titánu v kove. Tento problém bude ďalej analyzovaný v prípravnej fáze druhého odlievania. Faktom je že pre odliatky zhotovené pri prvom odlievaní strata veľmi dôležitých prvkov akými sú hliník a titán, znamená nemožnosť ďalšieho tepelného spracovania. Bez možnosti vykonania správneho tepelného spracovania na vzorkách z tejto tavby boli všetky pokusy o ladenie tohto procesu, ako aj výroba vzoriek pre ťahovú skúšku zastavené.

Samotné škrupiny vydržali proces odlievania a výsledné výrobky, aj napriek svojmu nezodpovedajúcemu chemickému zloženiu mohli byť analyzované pre zistenie prípadných nedostatkov technológie.

Pri prvej škrupine sme nenarazili na mnohé vady. Dôležitým poznatkom bol fakt, že kov zabehol veľmi dobre do oboch priečok, čo naznačuje že výfuky, ktorými bola opatrená jedna z priečok by nemuseli byť vo svojej podstate potrebné. Na obrázku 38 je znázornený prvý stromček odliatkov na vtokovom kole. Ako je možné si všimnúť, sú tieto odliatky bez zjavných povrchových väd. Po bližšom preskúmaní sa tieto odliatky ukázali ako bez závadnej výroby. Ďalšie opracovanie bolo avšak zamietnuté z dôvodu nesplnenia chemického zloženia, čo v konečnom dôsledku viedlo k vyradeniu týchto odliatkov z ďalších dokončovacích úprav.



Obr. 38: Odliatok prvej vtokovej zostavy

Pri druhej zostave, kde bola na stromček umiestnená séria šiestich priečok vybavených výfukmi už boli výsledky odlišné. Pri tomto stromčeku bolo zabehnutie kovu taktiež veľmi uspokojivé, vada nezabehnutia sa neukázala ani pri jednom z odliatkov, no všetky vyrobené exempláre niesli výrazné trhliny.

Zbiehavosť kovu bola natoľko dobrá, že bez seba menších problémov dokázal zaplniť nielen dutinu formy modelov ale aj stúpajúci kanál výfukových vedení na odliatkoch.

Tento efekt je sám o sebe veľmi dobrým poznatkom, no zároveň spôsobuje veľké problémy pri tuhnutí odliatkov. Zaplnením priestoru výfukov sa na koncoch produktov vytvorilo pomyselné „T“ ktoré fungovalo ako prekážka v prirodzenom zmršťovaní kovu. Tento efekt spolu s faktom že tuhnutie započalo od vonkajších, koncových bodov priečky vyústilo v nedostatok materiálu pre kompenzovanie napätia a zmršťovania v tepelnom uzle, ktorým bola oblasť bezprostredne pri vtoku. V tomto bode sa výsledné sily prejavili na potrhání materiálu ako je možné názorne pozorovať na obrázku 39.



Obr. 39: Trhliny na odliatkoch osem uholníkových priečok

Kľúčové výsledky zabiehavosti boli hodnotené na vtokových stromčekoch, ktoré obsahovali tenkostenné odliatky košov pre šable. Pri vyhodnocovaní modelu napojeného na vtokový kôl priamym spôsobom bolo zaznamenané plné dobehnutie kovu. Podobne ako aj v predchádzajúcom prípade bol kov schopný vystúpať po celej dĺžke výfukových vedení. Zbiehavosť v kritických miestach taktiež nepredstavovala v tomto experimente problém a model plne zabehol po celej svojej ploche ako je možné pozorovať na obrázku 40. Plocha celého odliatku presne kopíruje povrch škrupiny a na niektorých miestach je stále možné pozorovať štruktúry spôsobené pozostatkami vrstvenia materiálu pri výrobe 3D tlačných modelov. Tento jav je vo svojej podstate nedostatok a v ďalšom výrobnom procese bude snaha o jeho minimalizáciu či priamo odstránenie. Zásadná vada pri tomto odliatku nastala pri zaústení vtokového prvku.



Obr. 40: Odliatok tenkostenného koša šable

Ako je možné pozorovať na obrázku 40, je po obvod vonkajšej časti miesta vtoku niekoľko trhlín, najväčšie z nich sú ľahko viditeľné okom a dosahujú dĺžky rádovo niekoľko desiatok milimetrov. Tieto trhliny boli veľmi pravdepodobne spôsobené zlým spôsobom tuhnutia v oblasti okolia tepelného uzlu v bode vtoku. To malo za následok nedostatočné dosadzovanie kovu pri zmršťovaní, ktoré vyústilo do vzniku trhlín pri tomto kritickom mieste odliatku.

Je dôležité taktiež poznamenať problematiku odstraňovania vtokového systému z konvexnej časti modelu. Táto komplikácia bola predpovedaná už pri vzniku numerickej simulácie a ukázala sa ako opodstatnená. Nielen že je operačný priestor pre odstránenie vtoku v odliatku značne obmedzený, taktiež dochádza ku riziku poškodenia produktu pri tejto dokončovacej operácii. Tento druh výroby bol implementovaný do experimentu hlavne za účelom overenia zabiehavosti a možnosti kovu pri odlievaní veľmi tenkostenných odliatkov. Pre dokončovacie práce sa ukázal ako nevhodný. Odliatok nebol ďalej tepelne spracovávaný na základe chybného chemického zloženia ktoré by malo za následok ovplyvnenie mechanických vlastností.

Posledný stromček odliatkov obsahoval pár tvarových komponentov, na ktorých bolo pozorované zabiehanie tvarovo náročných záštít, ako aj druhý tenkostenný kôš navtokovaný metódou bočného napojenia. Aj v tomto prípade bolo zabehnutie kovu dostatočné v celom rozsahu odlievajúcich komponentov. Vyplnené boli všetky dutiny, ako aj tenkostenného koša, tak aj oboch tvarových záštít bez akýchkoľvek známk zachytenia vzduchu pri problematickom zabiehaní. Obe tvarové záštity ako aj odlievajúci kôš sú znázornené na obrázku 41. Pri bližšom preskúmaní výsledných produktov boli tieto dielce označené za zdravé. Vizualná kontrola ani následne vykonaná penetračná skúška neodhalili trhliny ktoré by svojimi rozmermi či hĺbkou predstavovali bezpečnostné riziká pri prevádzke dielov na meči.



Obr. 41: Vizualizácia odliatkov prvého odlievania materiálu Maraging 200

Ako je znázornené na obrázku 41, z koša bol odstránený vtokový kôš. Táto operácia bola zaistená upálením vtoku kyslíkovým horákom a jeho následné očistenie. Je nutné poznamenať že navzdory dostatočnemu výsledku bola aj táto operácia označená ako náročná pre dokončovacie úpravy pri výrobe tenkostenných odliatkov v malosériovej produkcii. Pre nesplňujúce chemické zloženie bol aj tento kôš ďalej nespracovávaný. Tvarové odliatky boli spracované a finalizované nakoľko sa jednalo o dielce pre meče vyrábané za reklamným účelom. Preto neboli na ich mechanické vlastnosti kladené tak prísne nároky ako na zbytok vyrábaných dielcov

8 DRUHÉ ODLIEVANIE OCELE MARAGING 200

Pri realizácii prípravných prác predchádzajúcich druhému odlievaniu z ocele Maraging 200 bolo venované veľké úsilie úprave technológie a výrobných postupov pre minimalizovanie či odstránenie všetkých výrobných problémoch ktoré boli zaznamenané pri prvom odlievaní.

Pozornosť bola venovaná modelom, ich vtokovým systémom ako aj samotnému procesu prípravy vsádzky pece pri tavbe. V neposlednej rade bola druhá tavba taktiež skúška možnosti

lokalizácie odliatkov do čo možno najoptimálnejšej polohy vzhľadom na vtokový kôl pre overenie možností malosériovej výroby produktov.

Druhá tavba materiálu Maraging 200 pozostávala zo 68 kg roztavenej ocele. Do odlievania boli zaradené dve škrupiny a celkovo bolo odliatych 24 odliatkov.

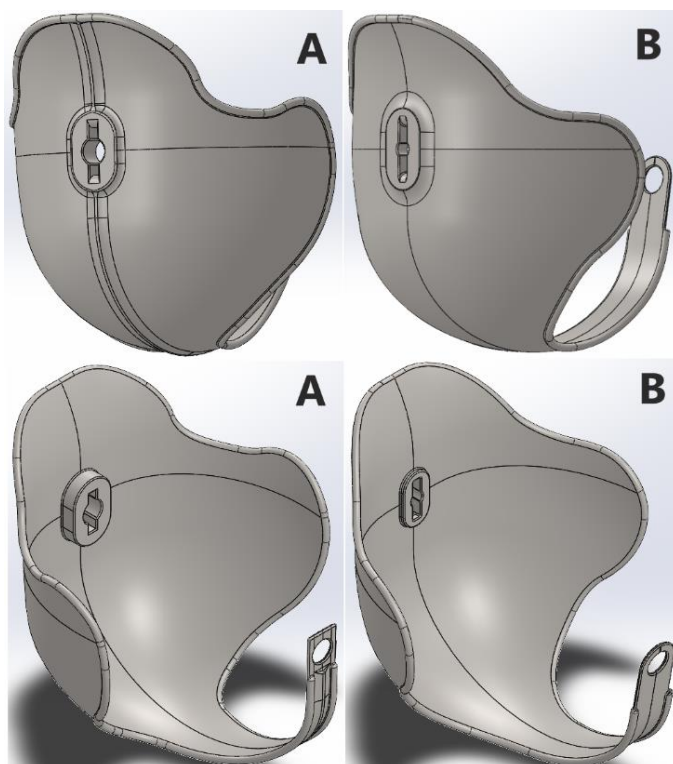
8.1 Modely

Prvé modely zaradené do druhej tavby boli, rovnako ako pri prvom odlievaní, základné osem uholníkových priečky mečov. Tie boli, rovnako ako v predchádzajúcom experimente, dodané v podobe voskových modelov. Problematika zastavenia predčasného vytavovania vtokového kola bola opäť zaistená použitím rýchlo tavitelného vosku z firmy Moravia tech a.s.. Po výsledkoch získaných v predchádzajúcom odlievaní bola technológia odlievania priečok pozmenená. Umiestnenie v rámci vtokového kola bolo ponechané, podobne ako sklon modelov vzhľadom na smer odlievania o 20 stupňov šikmo nadol. Tieto prvky boli vyhodnotené ako prospešné pre celkové zabiehanie materiálu a prúdenie kovu do dutín formy. Zmeny sa ukazujú na odstránení výfukových prvkov zo všetkých modelov. Tento krok bol účinný pre zaistenie nebrzdeného zmršťovania materiálu vo forme pri tuhnutí v snahe eliminovať vznik trhlín v tepelnom uzle odliatku. Na vtokový kôl osem uholníkových priečok boli, podobne ako v prvom odlievaní, zaradené testovacie telieska pre výrobu teliesok pre ťahovú skúšku odlievaného materiálu. Celkovo bolo na vtokový kôl umiestnených šesť kusov valcovitých teliesok. Ich rozmiestnenie kopírovalo polohy osem uholníkových priečok. Znázornenie tohto uloženia sa nachádza na obrázku 42.



Obr. 42: Vtoková sústava pre druhé odlievanie materiálu Maraging 200

Na vtokovú sústavu boli taktiež, s ohľadom na výrobné kapacity, priradené ďalšie modely. Pre svoj tvar a rozmery sa na vtok priradili tri zaistovacie prstence slúžiace ako poistné prvky pri kompletovaní šablí košov. Tieto modely boli pripevnené na vtok pomocou zošíkmených stienok spojujúcich model s vtokom a mierne sa rozširujúce pri styčnej ploche. Ďalšími dvoma modelmi umiestnenými na voskový stromček boli krytky rukovätí, taktiež používaných pri kompletovaní šablí, ktoré používajú tenkostenné koše. Tieto odliatky samy o sebe predstavovali ďalší problém, nakoľko sa jednalo o geometrie končiace veľmi tenkým profilom. Pre zaistenie správneho odvzdušnenia formy bol na koncové body týchto modelov pridaný spojitý odvzdušňovací prvok pre odvod plynov z dutiny formy.



Obr. 43: Zmena geometrie koša šable

šable pre zmenšenie tepelného uzla v týchto miestach odliatku. Nový model koša bol upravený týmto spôsobom vzhľadom pre docielenie vytvorenia celistvejšieho jednoliateho povrchu podobajúcemu sa čo najviac kovaným originálom. Odstránením rebra bola ale taktiež sťažená zbíhavosť kovu do už aj tak problematických bočných plôch modelu. Riešenie tohto problému



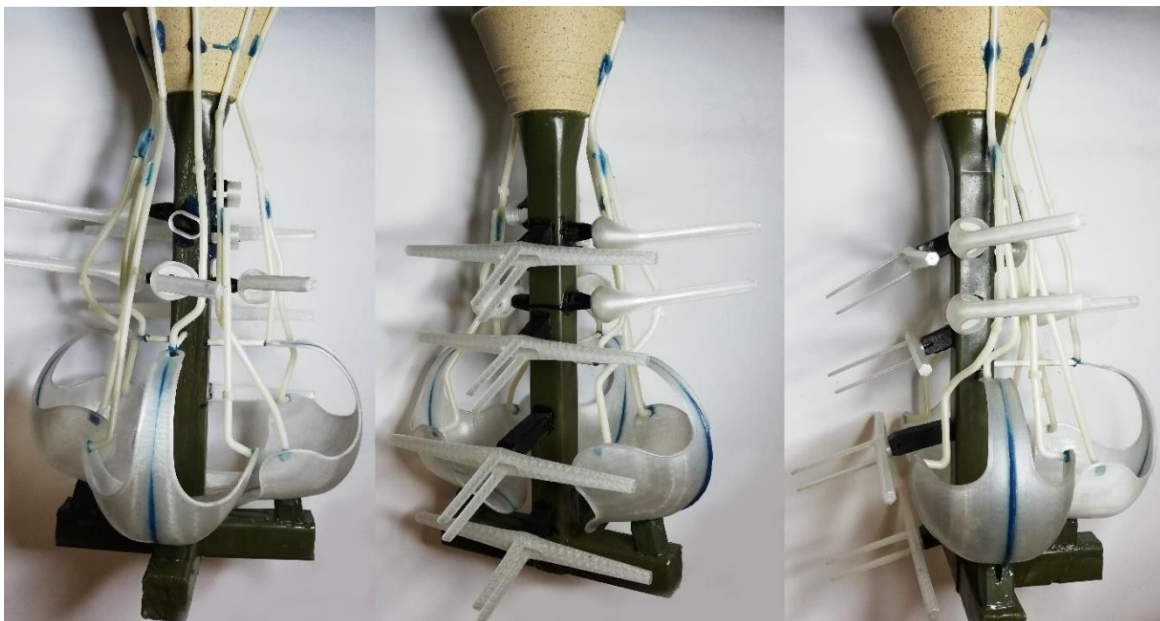
Obr. 44: Model koša šable

bolo mierne zmenšenie bočníc koša. Ako je možné pozorovať na obrázku 43, boky boli redukované zhruba o 20% svojej pôvodnej veľkosti pre opätovné uľahčenie zabiehanie kovu do úzkeho profilu dutiny formy. Modely vyrobené podľa novej geometrie boli po vytlačení a opracovaní taktiež dokončené modelovacím voskom. Model koša po zlepení a leptaní je ukázané na obrázku 44.

Druhý vtokový stromček bol vybavený tromi tenkostennými modelmi košov na šable. Pre toto odlievanie sa jedná o kľúčový stromček voskových modelov. Technologickou zmenou prešiel pri druhom odlievaní samotný dizajn geometrie modelov. Po výsledkoch z prvého pokusu, kde sa zbíhavosť materiálu ukázala ako omnoho menší problém s akým bolo pôvodne počítane, bol kôš zbavený stredového rebra ktoré sa tiahlo po celej dĺžke modelu. Rebro malo funkciu zlepšenia dosadzovacích schopností kovu v zapĺňaní veľkých plôch na oboch stranách modelu. Zmena geometrie je znázornená na obrázku 43 v porovnaní s pôvodným dizajnom viditeľným vľavo. Kôš bol taktiež zbavený niektorých hrán ako pri koncovej geometrii profilu viditeľnej na ľavej strane obrázku 43. zmenou taktiež prešiel bod cez ktorý prechádza čepeľ

Samotné modely boli tentokrát napojené na vtokový kôl, zhotovený z materiálu RUNNERPLUS, pomocou uloženia presne odpovedajúceho „uloženie 3“ spomínanom pri rozbere numerickej simulácie. Toto uloženie bolo zvolené pre pokojnejšie plnenie formy pri procese odlievania, ako aj možnosť umiestnenia vtoku na vonkajšiu konkávnú časť modelu. V tejto polohe je prístup k vtokovému bodu lepší. Tento krok mal za cieľ najmä uľahčenie dokončovacích

operácii odliatkov. Samotný tvar vtoku kopíruje pôvodný dizajn z prvého odlievania, jedná sa o teleso v tvare „V“ napájajúce sa do najhrubšieho miesta šable. Tvar „V“ je aj v tomto prípade volený pre umožnenie správneho zabehnutia obalovej hmoty do drážky modelu a tým zaistenie správneho odliatia produktu. Koše boli vybavené výfukovými prvkami rovnako ako pri prvom odlievaní. Celý vtokový stromček je znázornený na obrázku 45.



Obr. 45: Druhá zostava modelov pre druhé odlievanie materiálu Maraging 200

Vtokový stromček bol následne doplnený o ďalšie dve objímky a štyri modely krytiiek rukovätí. Tie boli pridané ako poistné modely pre prípad nezabehnutia kovu do niektorých dutín a nutnosti vyradenia krytiiek z ďalšieho postupu výroby.

V tomto prípade bolo zvolené vtokovanie bez odvodušňovacích prvkov. Na zbytok voskového stromčeka boli umiestnené štyri modely maďarských šablí. Tieto modely taktiež disponujú veľmi tenkostennými prvkami taktiež sledovanými pri druhom odlievaní materiálu Maraging 200 na prosbu firmy SIGI forge s.r.o.. Vtokovanie priečok maďarských šablí bolo zvolené jednoduchými telesami zakončenými tvarom „V“ podobne ako pri košoch. Priečky boli taktiež naklonené približne o 20 stupňov vzhľadom na smer odlievania kovu pre zlepšenie prúdenia kovu do dutiny formy. Pre elimináciu možného vzniku trhlín pri procese tuhnutia odliatku neboli ani na tieto modely aplikované žiadne výfuky.

8.2 Výroba keramických škrupín

Pri zhotovovaní prvej škrupiny bola implementovaná zmena od predchádzajúceho spôsobu nanášania vrstiev v prvom odlievaní. Z dôvodu implementácie problematických modelov na stromček sa v tomto prípade zvolila varianta nanášania prvých dvoch obalov na škrupinu ručným spôsobom pre zaistenie rovnomernosti základnej vrstvy obalov, najmä v miestach hrán tenkostenných krytiiek na rukoväte.

Pre prvý obal bola zvolená riedka keramická kvapalina Primcote s prísadou Ranco-sil TM 200 mesh v kombinácii s jemným zirkónovým posypom. Ten bol nasledovaný aplikáciou druhej vrstvy hustejšej keramickej kvapaliny v kombinácii so stredným posypom Mulu 30/80 značky Dupre Mineralis.

Po týchto obaloch bola škrupina upnutá do automatizovanej linky CYCLONE kde boli následne aplikované zostávajúce vrstvy spevňujúcich obalov Molochitu 1630 DD. Celkovo množstvo vrstiev bolo opäť stanovené na 8 zahŕňajúce prvý, jemný obal. Pre výrobu boli upravené uhly náklonu voskového stromčeka pri ponáraní do keramickej kvapaliny ako aj pri aplikácii posypov. Výsledná škrupina je znázornená na obrázku 46.



Obr. 46: Prvá škrupina druhého odlievania materiálu Maraging 200

Pri výrobe prvej škrupiny došlo počas automatického obaľovania ku závade. Tá bola spozorovaná až po ukončení všetkých cyklov v stroji CYCLONE. Problém je zobrazený na obrázku 47. Jedná sa o neobalené miesta na krytkách rukoväte šablí. Počas vnárania modelového stromčeka do keramickej kvapaliny sa do týchto miest žiadna nedostala. Miesto



preto zostalo suché a po prechode stroja do ďalšej pozície, ktorou je posýpač, na týchto miestach nepriľnul žiaden posyp. Kľúčový vplyv na vytvorenie tohto efektu pri obaľovaní malo samotné uloženie krytiel na vtokovom kole. Vzhľadom na smer ponárania boli tieto modely otočené konkávnou časťou nahor. Vďaka tomu bol v kritickom bode zachytený vzduch. Ten vytvoril bublinu ktorá sa v hustej keramickej kvapaline udržala na stene modelu aj napriek natáčaniu celého stromčeka robotickým ramenom. Tento vzduch bol dôvodom pre nesprávne obalenie modelov. Tieto body boli veľkými slabunami v pevnosti keramickej škrupiny a bez správnej opravy by znamenali isté prasknutie povrchu či pri vytavovaní alebo priamo pri odlievaní.

Vyradenie keramickej škrupiny a výroba nových modelov by bola nákladná a časovo náročná, preto sa zvolila oprava poškodených miest. Do bodov vád v obaloch bola ručne nanosená vrstva keramickej kvapaliny a následne aplikovaný stredný posyp Mulin 30/80 značky Dupre Mineralis. Škrupina bola následne ponechaná v klimatizovanom prostredí na prirodzené doschnutie. Tento proces bol vykonaný v troch na sebe nadväzujúcich cykloch. Škrupina bola po tomto procese zaradená do ďalších bodov výroby, pričom bola pod zvýšeným dozorom na výskyt akýchkoľvek problémov spojených s touto opravou.

Druhá škrupina, obsahujúca tenkostenné odliatky. Pri procese nanášania bol kladený dôraz na rovnomernosť a správne prevedenie nanášania vrstiev pre dobré kopírovanie povrchu modelov. Týchto podmienok bolo dosiahnutých zvolením ručného nanášania prvých troch posypov namiesto klasického ručného obaľovania iba prvej vrstvy pri zhotovovaní škrupiny.

Základná vrstva pozostávala z riedkej keramickej kvapaliny Primecote s prímiesou Rancosil TM 200 mesh nasledovaná posypom zirkónovým pieskom 50/80. Na túto základnú vrstvu nadväzovali dva obaly stredne zhotovené za použitia viac viskóznej keramickej kvapaliny v kombinácii so stredne hrubým zásypom Mulu 30/80, aplikovaným na voskový stromček ručným posýpaním s dôrazom na detailné hrany modelov, ako aj štrbiny v priečkach mečov a tenkostenných košoch šablí v miestach vtokovania. Po každom ručne aplikovanom posype bol stromček umiestnený do posýpacieho bubna stroja CYCLONE pre úplné dokončenie vrstvy Molochitovým posypom. Dokončenie prvých troch obalov nasledovalo upnutie voskového stromčeka do robotického ramena stroja CYCLONE a nadviazanie výroby škrupiny za pomoci automatizovaného procesu obaľovania. Ten pozostával z klasického programu používajúceho hustú keramickú kvapalinu v kombinácii s posypom Molochite 1630 DD. Program bol skrátený na päť obalových cyklov pre vytvorenie škrupiny s predom stanoveným celkovým počtom ôsmich obalov. Škrupina bola dokončená v automatizovanej linke za 125 minút prevádzkového času. Pri obaľovaní a po kontrole formy neboli lokalizované žiadne nedostatky a proces bol vyhodnotený ako úspešný. Škrupina zobrazená na obrázku 48 bola zaradená do ďalšieho kroku výrobného procesu.

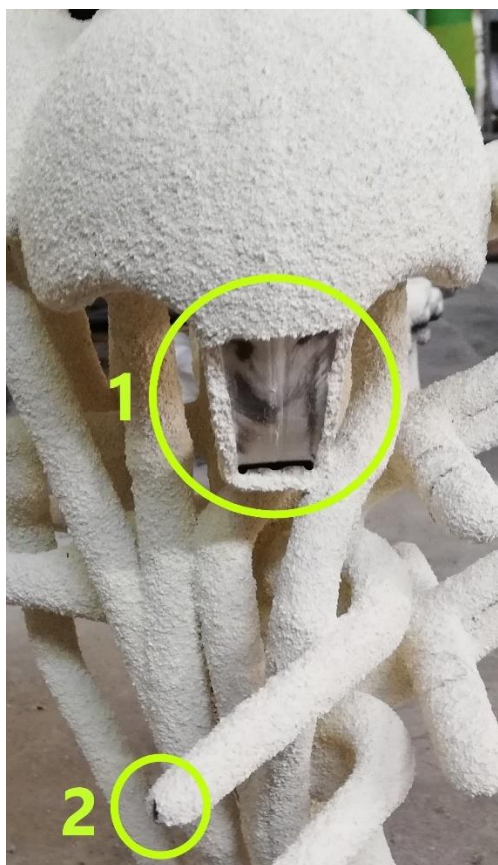


Obr. 48: Dokončená škrupina 2

Je dôležité poznamenať že pri krytkách na rukoväte, ktoré boli priradené na vtokový kôl na obrázku 48, došlo pred obaľovaním ku kontrole orientácie a overeniu spôsobu obaľovania v automatickej linke CYCLONE aby sa predišlo vzniku vady, opalizovanej na prvej škrupine. Taktiež bol pozorovaný ústup hrúbky obalov na koncoch úzkych profilov krytiel rukovätí.

Tento efekt bol spôsobený absenciou odvodušňovacích výfukov ktoré by zaobaľovali konce profilu. Tento problém bol zmeraný ale nebol vyhodnotený ako defekt obalu škrupiny a preto neboli v tomto kroku výrobného procesu učinené žiadne opatrenia pre jeho nápravu.

Nadväzujúcim krokom pri príprave keramických škrupín bolo vytavenie vosku spolu s vypálením plastového materiálu z dutiny formy. Tento proces bol opäť uskutočnený v plynovej peci s možnosťou prudkého nárastu teploty pre zabezpečenie potrebného tepelného šoku. Škrupiny boli do pece umiestňované postupne, ponechané na teplote 760°C po dobu približne 15 minút pre zabezpečenie úplného vyprázdnenia dutiny formy. Pri spracovaní prvej škrupiny obsahujúcej osem uholníkové priečky bola kladená pozornosť na správanie kritických miest, ktoré boli predmetom opravy vo výrobnéj fáze. Tieto miesta proces vydržali a škrupina bola zbavená vosku bez vážnych problémov.



Obr. 49: Poškodenie škrupiny 2

Pri vytavovaní druhej škrupiny, obsahujúcej tenkostenné modely košov pre šable došlo v procese vytavovania ku chybe. Škrupina na mieste zúženia profilu jedného z košov nevydržala a časť formy sa oddelila od zbytku. Vadu je možné pozorovať na obrázku 49 označenú v krúžku ako oblasť 1. Z tohto pohľadu je možné vidieť dieru vzniknutú po prasknutí škrupiny ktorá mala zhruba 2x3 centimetra. Ďalším problémom ktorý nastal pri vytavovaní druhej škrupiny bola penetrácia plynov z plastových modelov cez najslabšie miesta obalov krytiel na rukoväť. Táto vada je na obrázku 49 znázornená ako oblasť číslo 2. Pri vytavovaní vznikali v dutine formy tlaky príliš vysoké pre slabú vrstvu keramického obalu pokrývajúcu koncovú hranu modelov. Vada nastala pri každej zo štyroch krytiel rukoväte začlenených na tento vtokový kôl. Pre odlievanie bola táto vada neprípustná a musela byť spolu s prasklinou tenkostenného koša eliminovaná.

Zbytok procesu vytavovania prebehol bez ďalších komplikácií a forma bola zbavená všetkého voskového, ako aj plastového materiálu. Poškodená škrupina bola čiastočne odstavená pre validáciu poškodenia a možnosti opravy. Výroba novej škrupiny by aj v tomto prípade predstavovala finančnú a časovú

záťaž ktorý si projekt nemohol dovoliť. Návrhom riešenia bola oprava poškodených miest na krytkách rukovätí, označených ako oblasť 2, pomocou vysokoteplotného tmelu ktorý by mal efektívne uzatvoriť dierky v obale škrupiny. Návrhy riešenia zlomenej časti obalu v oblasti 1 boli dve. Prvé pracovalo s možnosťou odrezania celého modelu z vtokovej sústavy v prípade, ak sa nenájdu chýbajúce časti keramickej škrupiny. Tieto diely boli po ukončení vybavovacích procesov pozbierané a preto mohla byť dutina opravená za použitia týchto dielov v kombinácii s vysokoteplotným tmelom.

Forma bola opravená do stavu dostačujúceho pre odlievanie. Aplikácia tmelu avšak znemožnila druhej forme prejsť výplachom za pomoci vody. Ten bol implementovaný iba pri prvej forme. Výplach stlačeným vzduchom bol spravený pri oboch formách. Tento chýbajúci krok v prípravnom procese znamenal zvýšené riziko výskytu zbytkového popola v dutine druhej formy. Po prevedení týchto operácií boli obe formy pripravené na samotné odlievanie



Obr. 50: Obalené škrupiny

aplikáciou tepelne-izolačného materiálu DURABLANKET rovnako ako v prípravnej fáze prvého odlievania materiálu Maraging 200. Pri príprave týchto škrupín bol zvolený spôsob obalenia ktorý poskytol najlepšie výsledky. Obalenie bolo preto implementované ako celková spojitá vrstva obklopujúca škrupiny od vtokových kolov až po spodné časti. Takto upravené keramické škrupiny sú znázornené na obrázku 50. Z ľavej strany je možné pozorovať prvú škrupinu s osem

uholníkovými priečkami, na strane pravej je zobrazená škrupina s tenkostennými košmi. DURABLANKET bol na škrupiny upevnený niklovým drôtom ako jednovrstevný zábal. Toto opatrenie malo napomôcť zabíhaniu kovu do najužších miest tenkostenných profilov na modeloch, ako aj zlepšiť celkový spôsob tuhnutia v rámci škrupiny a umožniť dlhšie dosadzovanie kovu z vtokového kola. DURABLANKET taktiež svojou hrúbkou napomáhal pri stabilite foriem pri odlievaní kde fungoval aj ako tlmivá vrstva pri pokladaní krehkých škrupín do stabilizačných rámov pri odlievaní.

8.3 Odlievanie a zhodnotenie výsledkov

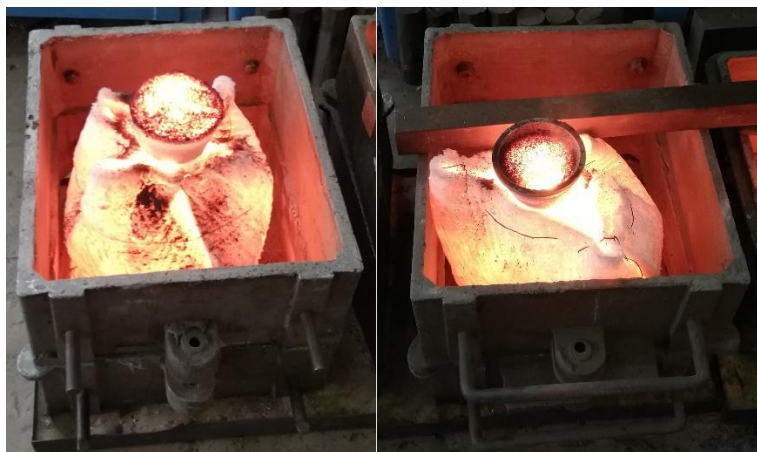
Pred započatím odlievania sa podobne ako v prvom experimente formy vložili do pece na žíhanie pri 1000°C pre dosiahnutie finálnych pevností keramických škrupín. Pri tomto procese sa taktiež vytvrdzoval vysokoteplotný tmel použitý pri oprave poškodených častí druhej formy. Proces bol sledovaný a finálne zatvrdnutie tmelu bolo ručne otestované. Výsledok testu bol uspokojujúci a preto bola forma pustená do ďalšej časti výrobného procesu.



Obr. 51: Žíhanie škrupín

Obe škrupiny boli v peci pred odlievaním ohriate a držané na teplote 1031°C . Pre druhé odlievanie bola zvolená jednotná teplota predohrevu keramických foriem na rozdiel od prvého experimentu. Táto úprava bola založená na zistenej zabíhavosti kovu do tenkostenných odliatkov, ktorá v prvom odlievaní splňovala všetky požiadavky, a preto bola nutnosť nahrievania škrupiny s tenkostennými košmi na šable nepovažovaná za nutnú. Na obrázku 51 je znázornená pec so škrupinami, pripravenými pre odlievanie.

Proces odlievania pozostával z prípravy odlievacieho poľa na ktoré boli umiestnené stabilizačné rámy odpovedajúcej veľkosti s ohľadom na rozmery škrupín s obalmi. Škrupiny boli držané na teplote 1031°C po dobu dvoch hodín pred odliatím. Po zavzdušnení objemu pece bol kov preliaty do odlievacej panvice pri teplote 1690°C . Počas odobraní vzorku z panvice započal presun keramických škrupín. Pri usadení do stabilizačného rámu bola táto škrupina odliata. Ihneď nasledovala druhá škrupina taktiež prinesená z pred ohrievacej pece a proces bol zopakovaný pričom bol na každý vtokový kôl aplikovaný exotermický zásyp. Odlievacia teplota na začiatku odlievania predstavovala 1575°C . Vysokoteplotný tmel použitý na opravu



Obr. 52: Škrupiny po druhom odlievaní

možné pozorovať na obrázku 52. V tomto prípade nebolo možné vidieť kov na koncoch výfukových vedení ako pri prvom odlievaní. Tento fakt predstavoval možné riziko zhoršeného prúdenia kovu do dutín formy.

poškodených miest na jednotlivých škrupinách tlak a teplotu kovu vydržal. Pri odlievaní nevznikli žiadne vady spôsobené roztrhnutím či prasknutím keramických škrupín. Celková doba odlievania od bodu odpichu taveniny z pece do odlievacej panvice až po bod zaplnenia druhej škrupiny trvala presne 165 sekúnd. Časový rámec procesu bol aj v tomto prípade vyhodnotený za dostačujúci. Keramické škrupiny po odliatí je

Vzhľadom na zásadný problém s chemickým zložením pri vyhotovovaní prvej tavby, boli pri druhej tavbe lepšie sledované postupy pri delegovaní taveniny. Pre dokumentáciu všetkých poklesov prímесových prvkov v kove bola taktiež odobraná vzorka materiálu po zatuhnutí z vtokového kola jednej formy. Táto vzorka bola podrobená rovnakému chemickému rozboru ako tavenina kovu. V tabuľke 8 sú uvedené všetky hodnoty prvkov predpokladaného zloženia materiálu, ako aj zloženie taveniny pri odpichu z pece do odlievacej panvice a napokon údaje získané zo stuhnutého materiálu odobraného z odliatku.

Tabuľka 8: Chemické zloženie ocele Maraging, druhé odlievanie

Požadované hodnoty chemického zloženia ocele Maraging 200									
C (%)	Al (%)	Ti (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Co(%)	Ni (%)	Mo (%)	B (%)
Max	Min	Min	Max	Max	Max	Max	Max	Max	Max
0,03	0,10	0,20	0,10	0,03	0,01	8,50	18,0	3,0	0,003
Chemické zloženie ocele Maraging 200 pri odpichu z pece počas druhého odlievania									
C (%)	Al (%)	Ti (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Co(%)	Ni (%)	Mo (%)	B (%)
0,009	0,03	0,128	0,209	0,011	0,003	8,286	18,41	3,113	0,001
Chemické zloženie ocele Maraging 200 odobrané z odliatku									
C (%)	Al (%)	Ti (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Co(%)	Ni (%)	Mo (%)	B (%)
0,009	0,022	0,114	0,210	0,008	0,003	8,182	17,93	3,118	0,001

Ako je možné pozorovať, chemické zloženie ani v tomto prípade nedosahuje optimálne hodnoty predpísané výrobnou normou. Problematické sa opäť ukazujú prvky Titán a Hliník. Odobranie vzorkov z modelu avšak prinieslo kľúčovú informáciu o probléme chemického zloženia ktorý sužoval už prvú tavbu materiálu. Pôvodne bol za vzniknutý problém s nesprávnym chemickým zložením označený zlý odhad spotreby ferozliatin užívaných pro delegovaní taveniny. V prvom odlievaní bol predpoklad využitia hliníku a FeTi70 určený na 80%. Pri druhom odlievaní boli hodnoty upravené na 50% využitia Hliníku a 70% využitia FeTi70. Napriek tejto zmene nastal pri druhej tavbe podobný problém. Po týchto informáciách a rozbere chemického zloženia odliatkov bolo usúdené že za pokles prvkov môže veľké prepálenie pri prelievaní roztaveného kovu z pece do odlievacej panvice. Tento efekt zapríčiňuje vznikajúce odchýlky v chemickom zložení výslednej oceli. Pri zhodnotení chémie druhého tavenia boli odliatky klasifikované ako splňujúce minimálne požiadavky na zloženie pre ďalšie testy materiálu Maraging 200.

Odliatky vyrobené v rámci prvej skupiny boli po vytlačení z keramickej škrupiny očistené a podrobené základnej vizuálnej kontrole. Po primárnej prehliadke stavu jednotlivých výrobkov



Obr. 53: Miera zmrštenia priečky

ponechaní voľného priebehu činila približne 2 milimetre na oboch stranách priečky. Pri odstránení výfukových prvkov z koncov priečok bola, podľa predpokladu, vada vznikajúcich trhlín pri odlievaní úplne odstránená.

bola zhodnotená zbiehavosť aj pri tomto experimente na dostačujúcu. Na osem uholníkových priečkach sa neukázali žiadne vady spôsobené zmršťovaním. Ako je možné pozorovať na obrázku 53, miera zmrštenia pri



Obr. 54: Vada na priečkach

Napriek týmto výsledkom boli na dvoch, osem uholníkových priečkach, umiestnených na hornej pozícii vtokovej sústavy pozorované vady. Tieto defekty sú zobrazené na obrázku 54 a predstavujú kombináciu nasledovných príčin: možný horšený odvod vzduchu z kritických miest, zhustnutie atmosféry v daných bodoch spôsobené ochladzovaním vzduchu a najmä malú metalo statickú výšku kovu tlačiaceho materiálu do dutiny formy. Tento vplyv by vysvetľoval najlepšie dôvod prečo boli tieto vady lokalizované výhradne na najvrchnejších pozíciách osem uholníkových priečok odlievajúcich v rámci prvej škrupiny. Riešenie tohto problému predstavuje priblíženie priečok ku sebe pri ďalšej výrobe a celkové posunutie zoskupení modelov smerom nadol vzhľadom na spôsob odlievania pre zaistenie dostatočného metalo statického tlaku pri každej úrovni odliatkov.

Priečky nesúce tento defekt boli očistené a zaslané do firmy SIGI forge s.r.o. pre spracovanie. Faktom totiž zostáva, že vady nastali na spojovacích prvkoch dielov, ktoré ale nie sú výrazne namáhané a cieľom spracovania bola testová implementácia jedného z defektných kusov do pokusného meču ktorý by bol podrobený crash testom pre zhodnotenie vplyvu tejto vady na funkčnosť odliatku v zostave. Pri vizuálnej kontrole zostávajúcich šiestich priečok neboli zistené tieto, ani iné vady spôsobené pri odlievaní a odliatky boli následne zaslané na spracovanie firme SIGI forge s.r.o. pre apretáciu hrubovaných kusov. Na obrázku 55 je znázornená jedna z priečok odlievajúcich v tejto škrupine označená za zdravý odliatok.



Obr. 55: Odliatok osem uholníkovvej priečky z materiálu Maraging 200

Ďalší problém nastal pri odliatkoch krytiel na rukoväť pre výrobu šablí. Ako je možné pozorovať na obrázku 56, pri výrobe dvoch kusov týchto odliatkov na rovnakom stromčeku došlo ku dvom vadám opačného charakteru. Pri prvom odliatku v oblasti označenej číslom 1 sa roztavený kov nedostal do celého prierezu dutiny. Tento problém nesúvisí s odvodom plynov nakoľko kov zabehol až na úplný koniec profilu a dokonca zatiekol aj do odvzdušňovacieho kanáliku ako je možné povšimnúť si na obrázku 56. Vada bola podľa všetkého vytvorená deformáciou samotnej dutiny v keramickej škrupine pri obaľovaní a vytavovaní modelu. Tým znemožnila postup kovu do týchto miest. Táto vada patrí medzi neopraviteľné a odliatok bol preto vyradený z nadväzujúcich dokončovacích operácií ako vadný kus. V oblasti označenej číslom 2 je možné povšimnúť si zatečenie kovu po hrane krytky na šaľbu. Tieto miesta predstavovali problematiku už pri obaľovaní modelov nakoľko keramická



Obr. 56: Vada pri odlievaní krytiel rukoväťí

škrupina nedokáže kopírovať hrany končiace bez rádiusu v plnej miere. V týchto miestach preto vznikla oblasť slabého spojenia jednotlivých obalových vrstiev keramickej škrupiny. Pri odlievaní bol tlak vyvinutý kovom na túto vrstvu príliš vysoký a materiál penetroval do steny keramickeho obalu. Táto vada je pomerne jednoducho opraviteľná a preto odliatky tohto druhu neboli považované za vadné. Po odrezaní a očistení boli aj tieto výrobky zaslané na dokončovacie operácie firme SIGI forge s.r.o..

Miesta opravované vysokoteplotným tmelom na druhej škrupine v tomto experimente, vydržali proces odlievania a škrupina sa počas procesu nerozpadla. To umožnilo odlíatie všetkých modelov ktoré sa na vtokovom stromčeku nachádzali. Po odstránení druhej škrupiny boli aj v tomto prípade odliatky podrobené základnej vizuálnej kontrole. Miesta na krytkách rukovätí niesli vizuálne vady spôsobené opravami v podobe miernych zatečenín kovu do



Obr. 57: Odliatky krytiel rukovätí

okrajových bodov škrupiny ako je možné pozorovať na obrázku 56. Podobne ako pri prvej škrupine sa na miestach hrany odliatku vytvorili zatečeniny kovu spôsobené nedostatočnou súdržnosťou keramickej formy v týchto miestach. Vady boli opäť opraviteľné a preto neboli odliatky ani v tomto prípade vyradené z ďalšieho spracovania. Na obrázku 57 je možné pozorovať príklad dvoch hrubovaných krytiel na rukoväť šable.

Kľúčovým odliatkom pre druhé odlievanie boli opäť tenkostenné koše. Tieto odliatky sa nachádzali na druhej škrupine, pričom jeden z nich bol opravovaný pred odlievaním. Tento konkrétny odliatok bol vážne poškodený pri oprave. Do miest kde bola vykonaná oprava



Obr. 58: Trhlina na koši šable

vysokoteplotným tmelom, podobne ako v prípade krytiel na rukoväť, penetroval kov a vytvoril na povrchu vady. Zostávajúce dva odliatky boli zhotovené v plnom profile a ani pri jednom exemplári nenastala vada nedobehnutie materiálu. Z pohľadu zabiehavosti ocele Maraging 200 bol tento experiment vyhodnotený ako úspešný. Kov opäť dosiahol až výfukových prvkov na modely a vystúpil do značnej výšky, čo poukazuje na veľmi privetivé podmienky pri odlievaní, teplotne ale aj metalo staticky, tlakom pôsobiacej taveniny. Na obrázku 58 je znázornený kôš po odstránení z vtokovej sústavy. Napriek veľmi dobrému zabehnutiu kovu do dutiny formy pri druhom odlievaní, neboli ani v tomto prípade vytvorené odliatky bez väd. Na jednom z košov bola

ihneď po odstránení keramickej formy pozorovaná trhlina na ploche tenkostenného profilu koša. Tento defekt bol pri porovnaní s trhlinami vzniknutými pri prvom odlievaní omnoho menší, dĺžka poškodenia bola rádovo 4 milimetre. Poškodenie je možné pozorovať na obrázku 58. Podľa pozície trhliny na profile odliatku je možné usudzovať že sa jedná o vadu spôsobenú zmršťovaním kovu pri procese tuhnutia. Ku vzniku tohto javu mohol do istej miery taktiež prispieť výfukový kanálik pripevnení na konci profilu modelu, ten zapríčinil zhrubnutie formy v mieste napojenia tohto prvku a v konečnom dôsledku mohol nepriaznivo ovplyvniť samotné

zmršťovanie modelu pri tuhnutí. Pri obal'ovaní kašovitých telies bol dobre zdokumentovaný fakt zhrubnutia škrupiny v konvexných častiach modelov. Tento efekt je spôsobený v samotnom tvare, ktorý napomáha zachytávaniu keramickej kvapaliny na týchto miestach modelu. Toto má za následok vznik hrubej škrupiny na vnútorných stranách takýchto voskových modelov. V kombinácii s výfukom vedeným z týchto miest, do ktorého vystúpil kov pri odlievaní sa vytvoril pomyselný hák na konci modelu. Rozpadavosť škrupiny po odliatí nebola dostatočná aby keramická vrstva praskla, kvôli jej nadmernej hrúbke. Táto kombinácia faktorov bola podľa odhadov najpravdepodobnejšou príčinou vzniku povrchových trhlín. Pre odstránenie tohto javu bude v ďalšom experimente riešená zmena polohy a natočenia výfukového elementu na voskovom modeli. Táto vada avšak nepredstavovala závalu na vyradenie odliatku z výroby, nakoľko je materiál Maraging 200 zveriteľný technológiou TIG.

Ďalšími odliatkami zhotovovanými v druhom odlievaní boli objímky na rukoväť šablí, zaist'ovacie skrutky a záštity mečov s tenkostennými prvkami dodané firmou SIGI forge pre sledovanie zabiehania materiálu pri ich odlievaní.



Obr. 59: Odliatky objímok a skrutiek

Prvý bod bol venovaný objímkam na rukoväť a spojovacím skrutkám. Oba tieto odliatky boli zhotovené bez pozorovaných problémov. Objímky boli priradené na prvý ako aj druhý voskový stromček pre vyplnenie miesta na vtokových koloch, podobne ako malé spojovacie skrutky. Výsledky z týchto odliatkov sú veľmi uspokojujúce. Všetky kusy boli zhotovené správne a mohli sa zaradiť do dlhšieho spracovania. Príklad odlievania objímok a skrutiek je zobrazený na obrázku 59 v hrubom stave po odstránení z vtoku formy.

Vizuálna kontrola vykonaná na záštitách obsahujúcich tenkostenné prvky taktiež neukázala žiadne viditeľné trhliny či nezabehnutie kovu do koncov všetkých profilov modelu. Výsledok odlievania bol dostačujúci napriek absencii akýchkoľvek odvzdušňovacích prvkov na koncoch profilov priečok. Tento fakt bol ďalším poznatkom pri študovaní možnosti výroby odliatkov z materiálu Maraging 200. Príklad výsledného odliatku záštity je znázornený na obrázku 60.



Obr. 60: Odliatok sledovanej záštity s tenkostenným profilom

9 ROZBOR CIEN VÝROBNÝCH POSTUPOV A ICH POROVNANIE

Pre ucelené zhodnotenie jednotlivých materiálov a výrobných procesov, je nutné zohľadniť výrobné náklady spojené s týmito výrobnými procesmi. Do výpočtu cien jednotlivých metód výroby priečok boli zahrnuté všetky zistené, dostupné údaje. Tie zahŕňujú náklady na vstupný materiál, náklady na výrobu foriem, modelov ako aj odliatie samotných dielcov. S ohľadom na celistvosť práce bola taktiež spravená finančná analýza nahrádzanej technológie laserových

výpalkov z materiálu Weldox 700. Ceny modelov každej technológie boli aproximované na výrobu jedného kusu alebo podľa hmotnosti vyrábaných produktov. Pri každej technológii budú taktiež spomenuté výhody a nevýhody týchto procesov z finančného hľadiska.

Pri cene výrobkov zhotovených nahrádzanou technológiou laserových výpalkov z materiálu **Weldox 700** spočíva základná investícia v kúpe polotovaru. Nákupná cena plechu Weldoxu 700 je 596,4 €. Tento plát je použitý pre zhotovenie 250 odrezkov priečok spolu s odpovedajúcim množstvom podperiek. Laserové spracovanie jednej priečky vychádza na 2,5 €. Vyhodenie dvoch kusov podperiek predstavuje nárast ceny o ďalších 0,7 €. Proces brúsenia priečky pozostáva z nasledujúcich úkonov:

- brúsenie na páse P36- 3 minúty
- brúsenie na páse P120- 3 minúty
- brúsenie podperiek- 3 minúty
- zvarovanie dielov priečky spolu so začistením povrchu- 6 minút
- dokončovacie brúsenie na brúsnom rúne- 3 minúty

Výsledný čas pri tomto druhu technológie predstavuje v priemere 17 až 20 minút na vyrobený kus. Cena práce kvalifikovaného pracovníka vykonávajúceho tieto operácie predstavuje nárast ceny každého výrobku o 2,5 €. Celková cena jednej priečky z materiálu Weldox 700 je približne: **8,5 €**.

Značným artiklom tejto výroby sa ukazuje práca človeka. Tento bod je taktiež ťažko opakovateľný a veľmi závisí na individuálnej zručnosti a skúsenostiach pracovníka zodpovedajúceho za výrobu dielu.

Pri zhotovovaní priečok z materiálu **42CrMo4** sa ako najdrahšia položka ukazuje forma na výroby voskových modelov. Cena tejto položky vychádza približne na 950 €. Hodnota sa líši v ohľadom na náročnosť vyrábaného modelu. Suma uvedená vyššie predstavuje cenu formy pre výrobu osem uholníkových priečok. Súhrnná cena za jedno kilo odliatku sa vo veľkosériovej produkcii pohybuje v rozpätí 21 až 31 €. Pri prevedení tejto sumy na jeden kus sa dostávame ku číslu 8,2 €. Dokončovacie operácie pozostávajú iba z brúsenia na kotúči P120 (3 minúty) a dobrušovaní na brúsiacom rúne (3 minúty). Hodnota práce vzťahnutej na opracovanie jedného kusu je 0,7 až 1€. Celková suma za odlievajú priečku z materiálu 42CrMo4 je rovná približne hodnote: **9,2 €**.

Pri určovaní výrobných nákladov pre materiál **Maraging** je nutné zohľadniť fakt, že sa jedná o experimentálnu výrobu. Napriek relatívne nízkej cene modelu z filamentu PolyCast™ ktorá predstavuje približne 5 € je cena celkového modelu ovplyvnená vyššou cenou škrupiny a materiálu. Toto navýšenie je spôsobené jednak cenou za rapídne prototypovanie na stroji CYCLONE ako aj cena samotného Maragingu ktorá je na 1 kg kovu približne dvojnásobne vyššia ako pri oceli 42CrMo4. Cena jednej škrupiny zhotovenej takýmto spôsobom je 120€. Pri materiály je cena na jeden odliatok po rozpočítaní približne 20 €. Dokončovacie úpravy Maragingových odliatkov predstavujú brúsenia na kotúči P120 (3 minúty) a dobrušovaní na brúsiacom rúne (3 minúty). Hodnota práce vzťahnutej na opracovanie jedného kusu predstavuje aj v tomto prípade 0,7 až 1 €. Celková hodnota odliatku je približne: **26 €**. [10]

Pri rekapitulácii zistených údajov je viditeľný nárast pri použití technológie presného odlievania o približne 1 € na odliatok. Táto cena je počítaná pre sériovú výrobu v oboch prípadoch. Napriek navýšeniu nákladov sa čas potrebný pre dokončenie jedného kusu znížil na jednu tretinu oproti Weldoxovým priečkam. Pri výhodách ktoré do výroby prináša technológia presného odlievania je tento nárast ceny viac než opodstatnený a prípustný. Pri materiály Maraging bola cena stanovená pre prototypové výrobky, preto nie je možné vyvodit' jednoznačné závery v porovnaní so sériovou výrobou. V tomto prípade je nutné poznamenať rýchlosť zhovenia prototypov a možnosť vyladenia technológie pred objednaním drahej formy na vstrekovanie vosku.

10 ZÁVERY

Cieľom práce bola náhrada technológie výroby priečok mečov zo súčiastok používajúce tvárnené polotovary na technológiu presného odlievania, ako aj experimentálne zistenie možnosti implementácie tejto technológie pri zhotovovaní tenkostenných odliatkov kopírujúcich dizajn kovaných súčiastok.

Preukázané výhody poskytované technológiou presného odlievania do keramických škrupín reprezentovali správnosť implementácie firmy SIGI forge s.r.o. týchto procesov do výroby športových mečov. Veľká voľnosť tvarových rozmerov ako aj zvýšenie náročnosti na dizajn výrobkov predstavuje široké spektrum možností pre rozvoj nových produktov. Diely o zrovnateľnom tvare zhotovované starou technológiou sa ukazujú ako časovo a finančne príliš náročné v porovnaní s odliatkami.

Výroba odliatkov technológiou presného odlievania bola realizovaná za použitia materiálu 42CrMo4. Pri experimentálnej časti práce bol tento materiál porovnávaný s navrhnutým materiálom Maraging 200. Napriek počiatočným problémom s chemickým zložením odliatkov bolo stanovené optimálne tepelné spracovanie materiálu pre dosiahnutia maximálnej tvrdosti pri zachovaní dobrých mechanických vlastností materiálu. Na základne prevedených ťahových skúšok na oboch používaných materiáloch boli odhalené nedostatky pri vzorkách z ocele 42CrMo4 spracovanej na hodnoty tvrdosti 52 HRC. Po konzultácii výsledkov, firma SIGI forge s.r.o. prešla na spracovávanie priečok mečov na znížené hodnoty tvrdosti v rozpätí od 46 do 48 HRC pre ich lepšie mechanické vlastnosti v prevádzke. Týmto hodnotám sa približovali aj výsledky materiálu Maraging 200.



Obr. 61: Ťahové tyčky z materiálu Maraging 200

Avšak pri realizácii ťahových skúšok z materiálu Maraging 200 nedosahovali namerané mechanické vlastnosti predpokladaných hodnôt. Ťažnosť materiálu ako aj medza pevnosti R_m boli nižšie ako odhadované hodnoty. Tento jav nastal pri tyčkách ktoré boli podrobené tepelnému spracovaniu ako aj pri tyčkách spracovaných iba procesom starnutia. Príčina týchto nezrovnalostí môže spočívať v nevyhovujúcom chemickom zložení či vo vytváraní vmestkov pri odlievaní kov. Na obrázku 61 sú znázornené pretrhnuté tyčky z ťahovej skúšky, po vizuálnej kontrole bola na ose tuhnutia taktiež lokalizovaná pórovitosť ktorá negatívne vplývala na získané výsledky. Pre určenie presnej príčiny nevyhovujúcich výsledkov ťahových skúšok sa odporúča realizácia fraktografického zhodnotenia štruktúry vzorkov.

Experimentálna výroba tenkostenných odliatkov bola realizovaná na modely záštity šable. Tento diel je pôvodom kovaná súčiastka. Zámerom pokusu bolo stanoviť či je možné za použitia technológie presného odlievania zhotoviť takýto diel. Pre túto úlohu boli zhotovené celkovo tri keramické škrupiny nesúce modely tejto súčiastky.

Odliatky boli zhotovované v dvoch sériách. Prvé odlievanie bolo z pohľadu testu zabiehavosti materiálu uzavreté ako úspešné. Problém pri tomto pokuse nastal v chemickom zložení odliatkov ktoré nespĺňovalo predpísanú normu. Podľa poznatkov nazbieraných v tomto procese boli implementované zmeny do procesu druhého odlievania. Zbiehavosť bola aj v tomto prípade hodnotená ako úspešná pri všetkých sledovaných odliatkoch.

Je nutné taktiež poznamenať sadu doplnkových modelov testujúcich schopnosti materiálu Maraging 200 pri zapĺňaní dutín forme tvarovo náročných modelov, či dielov s dlhými tenkostennými profilmi vo svojej geometrii. Celkovým výsledkom snaženia bolo vytvorenie funkčných výrobných procesov pre realizáciu každého druhu spomínaných odliatkov. Tieto postupy sú pripravené pre implementáciu v polo sériovej výrobe.

Pre ďalší rozvoj technológie je odporúčané mierne zlepšenie procesu tavenia a odlievania materiálu Maraging 200 pre skvalitnenie chemického zloženia výsledných produktov. V tomto ohľade bude nutné uskutočniť ďalšie testy.

Pri hodnotení výrobkov z materiálu Maraging 200 bola taktiež identifikovaná možná vada s tvrdosťou materiálu dosahujúcou hodnoty 42 HRC. Napriek zníženiu požiadavky na tvrdosť, ktorú pôvodne požadoval zadávateľ výskumu firma SIGI forge s.r.o., sa odporúča prechod na materiál Maraging 250, ak bude požadovaná vyššia tvrdosť výsledných produktov. Pri tomto kroku je potrebné dbať na zvýšenie cenu surového materiálu ako aj nutnosť overenia mechanických vlastností pre potvrdenie správneho fungovania navrhovaného materiálu v prevádzke. Tepelné spracovanie pre Maraging 250 je ďalším bodom výskumu pri rozhodnutí implementácie tejto zmeny materiálu do budúcej výroby.

Celkovým výsledkom diplomovej práce je zhotovenie série experimentálnych odliatkov. Tieto diely boli po opracovaní vo firme SIGI forge s.r.o. tepelne spracované. Vybrané reprezentatívne odliatky po dokončovacích úpravách sú znázornené na obrázku 62. Tieto diely budú po montáži podrobené praktickým testom pod dozorom pracovníkov firmy SIGI forge s.r.o..



Obr. 62: Vizualizácia finálnych produktov

POUŽITÉ ZDROJE [36]

- [1] *SIGI FORGE* [online]. [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://sigiforge.com/>
- [2] CAMPBELL, John. *Castings*. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003, viii, 337 s. : il. ISBN 0-7506-4790-6.
- [3] *SSAB* [online]. United States [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://www.ssab.com/>
- [4] Historical European martial arts. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2021 [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Historical_European_martial_arts
- [5] BEELEY, Peter a Robert SMART. *Investment Casting*. 1 ed. London: The Institute of Materials, 1995, 486 s. ISBN 0-901716-66-9.
- [6] Maraging 200 | Maraging 200 Steel. *MICHLIN METALS INC.* [online]. [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <https://www.michlinmetals.com/metal/maraging-200/>
- [7] STRAKA, Pavel. *Využití 3D technologií ve slévárenství* [online]. Brno, 2020 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/192862>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Vítězslav Pernica.
- [8] ProCAST. *ESI group: get it right* [online]. [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://www.esi-group.com/products/casting>
- [9] ORIGINAL PRUSA I3 MK3 TO MK3S UPGRADE KIT. *MATERIALPRO 3D* [online]. [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/fdm-tiskarny/original-prusa-i3-mk3-to-mk3s-upgrade-kit/?gclid=Cj0KCQjw3duCBhCAARIsAJeFyPWwd1ArusdlC0pJNfGF1euTekmC2VUy-a0EBg55Pp9Ke7aDc0c0yTQaAlvmEALw_wcB
- [10] POLYCAST FILAMENT NATURAL 1,75MM POLYMAKER 750G. *MATERIALPRO 3D* [online]. [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: https://www.materialpro3d.cz/specialni-filamenty/polycast-filament-natural-1-75mm-polymaker-750g/?fbclid=IwAR3RQFkCSotcdUmGPH3_qTpnzK9iY4uYV5qlEFrO76Q87eeDTIOPRq7xPlg
- [11] POLYCAST™. *3D Printing Solutions* [online]. [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.3dprintingsolutions.com.au/Polymaker/PolyCast-Filament>
- [12] ProJet MJP 2500 IC: Nový standard pro slévárenský průmysl. *ABC 3D* [online]. [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://www.abc3d.cz/produktova-stranka/3ds-projet-mjp-2500-ic>
- [13] 3D TISKÁRNA ORIGINAL PRUSA I3 MK3S+. *PRUSA RESEARCH: by Jozef Prusa* [online]. [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/original-prusa-i3-mk3/>

- [14] PolyCast™. *Polymaker* [online]. [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://eu.polymaker.com/product/polycast/>
- [15] Oboustranný ocelový tiskový plát se zrnitým práškovým PEI povrchem. *PRUSA RESEARCH* [online]. Česká republika [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://shop.prusa3d.com/cs/prislusenstvi-mk3s-mk25s-mini/214-oboustranny-ocelovy-tiskovy-plat-se-zrnitym-praskovym-pej-povrchem.html>
- [16] WELDOX 700. *SSAB* [online]. [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: chrome-extension://oemmnadbldboiebfnladdacbfmadadm/http://www.oblibene.com/userdata/shoping/gamaocel/File/_pdf/ew700.pdf
- [17] 42CrMo4. *OVAKO* [online]. [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://steelnavigator.ovako.com/steel-grades/42crmo4/>
- [18] WELDOX. *SSAB* [online]. [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: chrome-extension://oemmnadbldboiebfnladdacbfmadadm/https://www.mtladv.com/wp-content/uploads/2016/01/weldox-700.pdf
- [19] Oceli HARDOX, WELDOX a jejich svařování. *SVARINFO.cz* [online]. Česká republika [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2008061801>
- [20] BS EN 42CrMo4 | 1.7225 Alloy Engineering Steel. *ASTMSTEEL* [online]. [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.astmsteel.com/product/42crmo4-alloy-steel/>
- [21] Steel 42CrMo4: Steel 42CrMo4 products. *METINVEST* [online]. [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://metinvestholding.com/en/products/steel-grades/42crmo4>
- [22] KREETHI, R, A.K MONDAL a Krishna DUTTA. Ratcheting fatigue behaviour of 42CrMo4 steel under different heat treatment conditions. *Materials science & engineering. A, Structural materials: properties, microstructure and processing* [online]. Elsevier B.V, 2017, **679**, 66-74 [cit. 2021-03-17]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2016.10.019
- [23] KREWERTH, Dominik, Anja WEIDNER a Horst BIERMANN. Investigation of the Damage Behavior of Cast Steel 42CrMo4 During Ultrasonic Fatigue by Combination of Thermography and Fractography. *Advanced Engineering Materials* [online]. 2013, **15**(12), 1251-1259 [cit. 2021-04-07]. ISSN 1438-1656. Dostupné z: doi:10.1002/adem.201300124
- [24] SHA, W., A. CERREZO a G. SMITH. Phase chemistry and precipitation reactions in maraging steels: Part IV. Discussion and conclusions. *Metallurgical and Materials Transactions A* [online]. New York: Springer US, 1993, **24**(6), 1251-1256 [cit. 2021-03-17]. ISSN 1073-5623. Dostupné z: doi:10.1007/BF02668193
- [25] SHA, W, A YE, S MALINOV a E.A WILSON. Microstructure and mechanical properties of low nickel maraging steel. *Materials science & engineering. A, Structural materials: properties, microstructure and processing* [online]. Elsevier B.V, 2012, **536**,

129-135 [cit. 2020-10-29]. ISSN 0921-5093. Dostupné z:
doi:10.1016/j.msea.2011.12.086

- [26] WANG, Wei, Wei YAN, Qiqiang DUAN, Yiyin SHAN, Zhefeng ZHANG a Ke YANG. Study on fatigue property of a new 2.8 GPa grade maraging steel. *Materials science & engineering. A, Structural materials: properties, microstructure and processing* [online]. Elsevier B.V, 2010, **527**(13-14), 3057-3063 [cit. 2020-10-29]. ISSN 0921-5093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2010.02.002
- [27] SHA, W., Z. CHEN, X.X.X. GERILETU, J.S. LEE, S. MALINOV a E.A. WILSON. Tensile and impact properties of low nickel maraging steel. *Materials Science & Engineering A* [online]. Elsevier B.V, 2013, **587**, 301 [cit. 2020-10-29]. ISSN 0921-5093. Dostupné z:
https://primo.lib.vutbr.cz/permalink/f/1pt3lf4/TN_elsevier_sdoi_10_1016_j_msea_2013_08_076
- [28] HALL, A a C SLUNDER. BATTELLE MEMORIAL INST COLUMBUS OH COLUMBUS LABS. *The Metallurgy, Behavior, and Application of the 18-Percent Nickel Maraging Steels*. United States, 1968. Dostupné také z:
<http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA382105>
- [29] SHA, W., A. YE, S. MALINOV a E.A. WILSON. Microstructure and mechanical properties of low nickel maraging steel.(Report). *Materials Science & Engineering A* [online]. Elsevier B.V, 2012, **536**, 129 [cit. 2020-10-29]. ISSN 0921-5093. Dostupné z:
https://primo.lib.vutbr.cz/permalink/f/1pt3lf4/TN_gale_ofa279052684
- [30] MARCISZ, J., M. ADAMCZYK a B. GARBARZ. Optimisation of Mechanical Properties of 18%Ni350 Grade Maraging Steel Using Novel Heat Treatment. *Archives of metallurgy and materials* [online]. Polish Academy of Sciences, 2017, **62**(1), 73-84 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: doi:10.1515/amm-2017-0010
- [31] AISI Grade 18Ni (200) Maraging Steel, Aged, 32 mm round bar, tested in longitudinal direction. *MatWeb: MATERIAL PROPERTY DATA* [online]. [cit. 2021-05-19]. Dostupné z:
<http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=ab20e4a12f8b41d4aace33418d2f33b5&ckck=1>
- [32] Aged Grade 200 Maraging Steel. *Material Properties Database* [online]. [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/Aged-Grade-200-Maraging-Steel>
- [33] SHARMA, Ankit, Alok AGARWAL, Mayukh ACHARYA, S.C GOVIND a S.C SHARMA. Optimization of Aging Cycle of Stainless Maraging Steel Using Dilatometric and Differential Scanning Calorimetric Analysis to Improve its Strength. In: *Materials Science Forum* [online]. Pfaffikon: Trans Tech Publications Ltd, 2015, , s. 147-150 [cit. 2021-03-17]. ISBN 9783038355366. ISSN 02555476. Dostupné z:
doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.830-831.147

- [34] MK TECHNOLOGY – CYCLONE: OTHER MACHINE TOOLS. *Multistation* [online]. [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.multistation.com/en/product/mk-technology-cyclone/>
- [35] KÜGELGEN, Michael. From 7 days to 7 hours – Investment casting parts within the shortest time. *WFC - World Foundry Congress*. Chennai, India, 2008, (68), 5.
- [36] *CITACE PRO* [online]. [cit. 2019-05-21]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

ZOZNAM OBRÁZKOV:

Obr. 1: Príklady výrobkov firmy SIGI forge [1]	10
Obr. 2: Hlavica [1]	12
Obr. 3: Výrobné body priečky z materiálu Weldom 700	13
Obr. 4: Príklad priečky meča firmy SIGI forge s.r.o. [1]	14
Obr. 5: Nebezpečné poškodenie priečky meča	15
Obr. 6: Osem hranná priečka meča firmy SIGI forge s.r.o.	17
Obr. 7: Geometria koša šabl'e.....	17
Obr. 8: Zostava šabl'e a jednotlivé diely	18
Obr. 9: Vizualizácia geometrií	18
Obr. 10: Druhy vtakovania modelov.....	19
Obr. 11: Súhrnné znázornenie zaplňovania dutiny formy a rozloženie teplotných polí	20
Obr. 12: Detekcia uzatvárania vzduchu vo fázy plnenia.....	20
Obr. 13: Vizualizácia usmerneného tuhnutia	21
Obr. 14: Príklad sériovo vyrábanej priečky z materiálu 42CrMo4	22
Obr. 15: ORIGINAL PRUSHA I3 MK3S+ [9].....	23
Obr. 16: Príklad efektu technológie Ash-Free™ [14]	25
Obr. 17: Vizualizácia technológie Layer-Free™ [14].....	25
Obr. 18: Chyba pri tlači modelu koša šable	26
Obr. 19: Dokončený výtláčok koša šable	27
Obr. 20: Postup výroby modelu koša šable z materiálu PolyCast™	27
Obr. 21: Model tvarových priečok meča.....	28
Obr. 22: Zničená priečka z materiálu Weldom 700	30
Obr. 23: Lom priečky z materiálu 42CrMo4.....	31
Obr. 24: Grafický priebeh ťahových skúšok pre Maraging 200	35
Obr. 25: Grafický priebeh ťahových skúšok pre 42CrMo4	36
Obr. 26: Stroj Cyclone [34].....	38
Obr. 27: Schéma stroja Cyclone [35]	38
Obr. 28: Vtoková zostava s dvoma osem uholníkovými priečkami.....	40
Obr. 29: Vtoková zostava šiestich priečok.....	41
Obr. 30: Vizualizácia vtakovania tenkostenného modelu koša šable	42
Obr. 31: Kombinovaná vtoková sústava	43
Obr. 32: Ručná aplikácia prvej vrstvy škrupiny.....	43
Obr. 33: Výrobný postup stroja CYCLONE.....	44
Obr. 34: Oprava škrupiny koša šable	44
Obr. 35: Keramické škrupiny obalené materiálom DURABLANKET	45
Obr. 36: Obalené keramické škrupiny v žihacích peciach	46
Obr. 37: Odliate škrupiny prvého tavenia materiálu Maraging 200	46
Obr. 38: Odliatok prvej vtokovej zostavy	47
Obr. 39: Trhliny na odliatkoch osem uholníkových priečok	48
Obr. 40: Odliatok tenkostenného koša šable	48
Obr. 41: Vizualizácia odliatkov prvého odlievania materiálu Maraging 200	49
Obr. 42: Vtoková sústava pre druhé odlievanie materiálu Maraging 200.....	50
Obr. 43: Zmena geometrie koša šable	51
Obr. 44: Model koša šable.....	51
Obr. 45: Druhá zostava modelov pre druhé odlievanie materiálu Maraging 200	52

Obr. 46: Prvá škrupina druhého odlievania materiálu Maraging 200	53
Obr. 47: Vada pri obaľovaní škrupiny	53
Obr. 48: Dokončená škrupina 2.....	54
Obr. 49: Poškodenie škrupiny 2	55
Obr. 50: Obalené škrupiny	55
Obr. 51: Žihanie škrupín	56
Obr. 52: Škrupiny po druhom odlievaní.....	56
Obr. 53: Miera zmrštenia priečky	57
Obr. 54: Vada na priečkach.....	58
Obr. 55: Odliatok osem uholníkovej priečky z materiálu Maraging 200.....	58
Obr. 56: Vada pri odlievaní krytiel rukovätí	58
Obr. 57: Odliatky krytiel rukovätí	59
Obr. 58: Trhlina na koši šable	59
Obr. 59: Odliatky objímok a skrutiek.....	60
Obr. 60: Odliatok sledovanej záštity s tenkostenným profilom	60
Obr. 61: Ťahové tyčky z materiálu Maraging 200	62
Obr. 62: Vizualizácia finálnych produktov	63

ZOZNAM TABULIEK:

Tabuľka 1: Chemické zloženie materiálu Weldom 700 [16]	29
Tabuľka 2: Chemické zloženie materiálu EN 42CrMo4 [20]	30
Tabuľka 3: Chemické zloženie materiálu Maraging 200	32
Tabuľka 4: Meranie tvrdosti materiálu Maraging 200	34
Tabuľka 5: Mechanické vlastnosti materiálu Maraging 200.....	34
Tabuľka 6: Mechanické vlastnosti materiálu 42CrMo4.....	36
Tabuľka 7: Zrovnanie chemického zloženia materiálu Maraging 200	47
Tabuľka 8: Chemické zloženie ocele Maraging, druhé odlievanie	57